

# CORREÇÃO AUTOMÁTICA DO FATOR DE POTÊNCIA POR MEIO DE UM COMPENSADOR ESTÁTICO DE POTÊNCIA REATIVA (SVC)

LUCAS C. SOUZA, THIAGO O. FARIAS, JOSÉ A. LAMBERT, FERNANDO N. MARQUES, LUCIANO S. C. SILVA

*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Jataí  
Rua Maria Vieira Cunha, 775, Residencial Flamboyant, CEP 75804-714, Jataí, GO, Brasil  
E-mails: lucas.souza@ifg.edu.br, thiago.farias12@hotmail.com, jose.lambert@ifg.edu.br,  
fjm765@yahoo.com.br, lucianocosta\_@hotmail.com*

**Abstract**— This paper proposes the closed loop control of a Static VAR Compensator (SVC), aiming at the regulation of the fundamental power factor of an electrical installation from the compensation of reactive. In the algorithm of control shipped to the SVC is applied the theory of Instant Power, providing versatility to the microcontroller in the processing of control variables. The closed-loop operation of the SVC prototype, with reactive power compensation capability in the range of 453.16 VAR inductive to 3021.05 VAR capacitive, indicates that the control system follows the desired reference, with good precision, resulting in correction power factor.

**Keywords**— SVC, Control System, Theory p-q, Microcontroller, Power Factor

**Resumo**— Este artigo propõe o controle em malha fechada de um *Static VAR Compensator (SVC)*, objetivando a regulação do fator de potência fundamental de uma instalação elétrica a partir da compensação de reativos. No algoritmo de controle embarcado ao SVC é aplicado a Teoria de Potência Instantânea, proporcionando versatilidade ao microcontrolador no processamento das variáveis de controle. A operação em malha fechada do protótipo de SVC, com capacidade de compensação de potência reativa na faixa de 453,16 VAR indutivo à 3021,05 VAR capacitivo, indica que o sistema de controle segue a referência desejada, com boa precisão, resultando na correção automática do fator de potência.

**Palavras-chave**— SVC, Sistema de Controle, Teoria p-q, Microcontrolador, Fator de Potência

## 1 Introdução

A potência elétrica provida às instalações consumidoras de energia é caracterizada por um número complexo, possuindo componente real relacionada a potência ativa e parte imaginária referente a potência reativa. A parcela ativa é aquela que efetivamente realiza trabalho útil, enquanto que a componente reativa é a potência processada por reatâncias, no armazenamento de energia magnética ou elétrica. Apesar de estar presente nas operações das cargas, a energia reativa demandada dos alimentadores deve ser a menor possível, pois todo o excesso da mesma é inconveniente ao sistema elétrico, seja o reativo indutivo ou capacitivo (RIOS *et al.*, 2014; ANICETO, 2016).

O excesso de reativo em circuitos elétricos traz como consequências a redução do fator de potência, produzindo efeitos indesejados, tais como: sobrecarregamento das redes elétricas, aquecimento de condutores e equipamentos, quedas de tensão, necessidade de maiores investimentos em geração, transmissão e distribuição, incidência de ônus nas contas de energia (SILVA, 2009).

Com o intuito de se evitar o transporte de energia reativa de terminais distantes de uma unidade consumidora, têm-se a instalação de equipamentos de suporte a reativos como melhora ao rendimento de um sistema elétrico. Como metodologia clássica há o emprego de bancos de capacitores. No entanto, este tipo de compensação somente é conveniente para cargas que demandam potência reativa constante ou que apresentam variações com dinâmica lenta. Como

alternativa vantajosa para correção do fator de potência há o emprego do SVC (*Static VAR Compensator*), que apresenta como principal característica a flexibilidade proporcionada pela eletrônica de potência, permitindo maior velocidade e precisão no controle de um ou mais parâmetros no sistema de potência (PASCHOARELI, 2007).

O SVC faz parte de um grupo de dispositivos pertencentes a tecnologia *FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System)*, os quais foram introduzidos como meio de flexibilização do sistema elétrico, incorporando a capacidade do controle direto do fluxo de potência ao nível de transmissão de energia elétrica (HINGORANI e GYUGYI, 2000). O SVC também é caracterizado como um controlador *shunt*, tendo sua operação baseada na injeção ou absorção de potência reativa (MIOTTO, 2010).

Usualmente, o compensador SVC, presente na primeira geração dos controladores *FACTS*, é aplicado para solucionar um conjunto de restrições presentes na transmissão de energia elétrica, relacionada com problemas de estabilidade, principalmente com relação ao controle de tensão (WATANABE *et al.*, 1998). No entanto, o mesmo é capaz de operar no sistema de distribuição e, ainda, conectado em uma instalação elétrica em baixa tensão como compensador de potência reativa.

Nos trabalhos de Szabó *et al.* (2014) e Mokhtari *et al.* (2010) são propostos algoritmos de controle, aplicados ao SVC e testados via simulação computacional, para a compensação do fator de potência em sistemas de distribuição de energia elétrica. No entanto, em ambas as propostas apresentadas, a obten-

ção dos valores de tensão e corrente para o posterior cálculo das potências ativa e reativa, não contempla a característica harmônica presente nas redes de distribuição, onde a natureza das cargas conectadas é diversa. Logo, em um ambiente em que há distorção de corrente, o cálculo da potência reativa pelo triângulo de potências não representa a potência reativa clássica processada por elementos reativos. Dessa forma, os sistemas apresentados, operando em uma rede em condições de correntes não senoidais, não serão capazes de compensar efetivamente a potência reativa fundamental devido as componentes de sequência positiva de tensão e corrente.

As propostas anteriores tratam o sistema trifásico como se fossem três sistemas monofásicos independentes, fato que não está em consonância com a norma IEEE std 1459-2010, em que uma rede trifásica deve ser tratada como uma única entidade que transmite energia elétrica.

Neste trabalho foi proposto um sistema de controle do SVC para correção automática do fator de potência, compensando a potência reativa demandada por um bloco de cargas trifásicas. A aplicação prática considera as restrições reais de um processo de controle digital em tempo real. O controle é baseado na aplicação da teoria de potência instantânea, denominada como Teoria p-q, proposta por Akagi *et al* (2007). Essa concepção permite a obtenção das potências real e imaginária em sistemas trifásicos equilibrados e desequilibrados, com e sem a presença de componentes harmônicos. Tal processo viabiliza a medição das potências ativa e reativa fundamentais, através de um processo de cálculo simples, que demanda pouca capacidade de processamento do microcontrolador responsável pelo controle digital e automático do Fator de Potência Fundamental ( $fp_1$ ).

## 2 Compensador Estático de Potência Reativa

A Figura 1 apresenta o esquema elétrico do compensador SVC conectado em paralelo com um bloco de cargas trifásicas. Para a atuação do SVC no sistema, são mensuradas as tensões de linha no Ponto de Aclomplamento Comum (PAC), e as correntes de linha da carga, sendo estes sinais posteriormente processados digitalmente pelo microcontrolador que embarca o sistema de controle digital. O processamento digital de sinais proporcionará a obtenção das variáveis de controle, principalmente as potências ativa e reativa demandadas pela carga, necessárias para a requerida atuação do estágio de potência do SVC.

O resultado do processamento digital de sinais é o ângulo de disparo para o comando dos tiristores que compõem o Reator Controlado a Tiristor (RCT), que em paralelo com o capacitor fixo resultará no comportamento de susceptância controlada, que leva a característica de potência reativa controlada.

Dispondo dos elementos sensores e atuadores, o sistema de controle irá operar em malha fechada por intermédio do algoritmo de controle digital, tendo como variável de referência o fator de potência fundamental desejado, promovendo a compensação de reativos automaticamente.

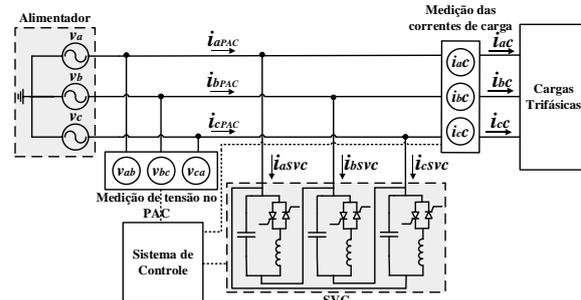


Figura 1. Compensação do fator de potência através do compensador SVC.

## 3 Sistema de Controle Digital Embarcado ao SVC para correção automática do fator de potência fundamental

O dispositivo utilizado para o processamento digital de sinais é o microcontrolador PICCOLO TMS320C28069M, da Texas Instruments, que contém os recursos necessários para a execução do controle do SVC. A malha de controle do SVC, aplicada no microcontrolador, elaborada com o objetivo de compensação do  $fp_1$ , é apresentada na Figura 2.

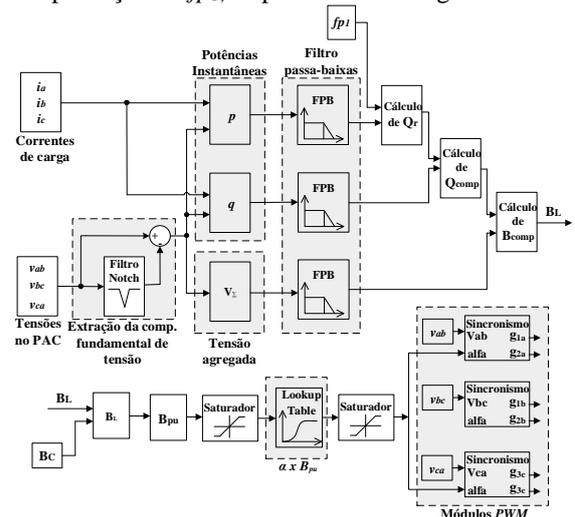


Figura 2. Malha de controle de  $fp_1$

Para a compensação do  $fp_1$ , inicialmente obtém-se a componente fundamental das tensões do PAC através da implementação digital de um filtro notch, eliminando qualquer distorção no sinal. O sinal selecionado pelo filtro notch é processado pelo bloco  $v_z$  para a obtenção do valor eficaz da tensão agregada instantânea, cuja quantidade numérica refere-se ao valor eficaz fundamental da componente de sequência positiva das tensões no PAC (AKAGI; WATANABE e AREDES, 2007). O valor eficaz da

tensão agregada instantânea pode ser calculado pela relação matemática descrita em (1).

$$v_{\Sigma} = \sqrt{\frac{v_{ab}^2 + v_{bc}^2 + v_{ca}^2}{3}} \quad (1)$$

Como pode ser observado em (1), o cálculo de  $v_{\Sigma}$  é obtido como função das tensões de linha, sendo conveniente para o processamento digital na aplicação específica, uma vez que os sinais das tensões de linha já são disponibilizados pela placa de Processamento Analógico de Sinais (PAS) para o sincronismo dos disparos dos tiristores. O desequilíbrio presente nas tensões de linha contribuirá apenas com a parcela oscilante da tensão agregada instantânea. Logo, a componente de valor médio de  $v_{\Sigma}$  apresentará equivalência numérica com o valor eficaz da componente fundamental em sequência positiva da tensão de linha (AKAGI; WATANABE e AREDES, 2007).

No bloco  $p$  é realizado o cálculo de potência ativa instantânea trifásica, calculada a partir das tensões instantâneas de linha e correntes de linha (AKAGI; WATANABE e AREDES, 2007). Tomando como ponto de referência a fase b, por exemplo, a potência ativa instantânea ( $p$ ) é calculada em (2).

$$p_{3\phi} = v_{ab}i_a - v_{bc}i_c \quad (2)$$

Concomitantemente, no bloco  $q$  é efetuado o cálculo da potência reativa instantânea trifásica ( $q$ ), a partir das tensões e correntes de linha, conforme (3) (AKAGI; WATANABE e AREDES, 2007).

$$q_{3\phi} = v_{bc}i_a + v_{ca}i_b + v_{ab}i_c \quad (3)$$

As potências  $p$  e  $q$ , podem ser decompostas em uma parcela de valor médio e outra oscilante, como indicado nas relações matemáticas (4) e (5) (AKAGI; WATANABE e AREDES, 2007).

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (4)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (5)$$

Sendo que  $\bar{p}$  e  $\bar{q}$ , indicam a parcela média das potências instantâneas ativa e reativa, respectivamente, e  $\tilde{p}$  e  $\tilde{q}$  assinalam a parte oscilante das potências instantâneas ativa e reativa.

O valor de  $\tilde{p}$  e  $\tilde{q}$  é devido ao produto das componentes de tensão e corrente, de mesma sequência, seja positiva ou negativa, e de mesma ordem harmônica. Os desbalanços e harmônicos gerados por uma carga, assim como os desequilíbrios e distorções nas tensões da fonte irão contribuir para as parcelas oscilantes  $\tilde{p}$  e  $\tilde{q}$  (AKAGI; WATANABE e AREDES, 2007).

Para eliminação das parcelas oscilantes que compõem os cálculos de  $p$  e  $q$ , implementou-se um filtro passa-baixas digital, de 2º ordem, com frequência de corte em 6 Hz, garantindo a rejeição máxima das componentes oscilantes que possam existir, resultando na obtenção das parcelas médias constantes de  $p$  e  $q$  no bloco FPB. Ainda, o cálculo do valor agregado da tensão eficaz instantânea é também processado pelo bloco FPB, referente ao filtro passa-baixas,

para eliminação das parcelas oscilantes que possam existir, garantindo como resultado o valor eficaz da tensão fundamental em sequência positiva.

O cálculo da potência reativa resultante do conjunto carga e compensador, necessária para garantir a correção do fator de potência para o valor de referência ( $fp_r$ ), é obtido como função da potência ativa fundamental da carga ( $P$ ). Partindo-se do pressuposto que o SVC, idealmente, não processa potência ativa, obtêm-se em (6) e (7) a potência aparente resultante ( $S_r$ ) como função de  $P$  e  $fp_r$  ou como função de  $P$  e  $Q_r$ .

$$S_r = \frac{P}{fp_r} \quad (6)$$

$$S_r^2 = P^2 + Q_r^2 \quad (7)$$

Relacionando-se (6) e (7), pode-se reescrever  $Q_r$  em (8) como função de  $P$  e  $fp_r$ :

$$Q_r = \sqrt{\left(\frac{P}{fp_r}\right)^2 - P^2} \quad (8)$$

A potência reativa de compensação ( $Q_{comp}$ ) é obtida em (9) como função da potência resultante,  $Q_r$ , e da potência reativa da carga,  $Q_l$ .

$$Q_{comp} = Q_r - Q_l \quad (9)$$

Sabe-se que a característica de susceptância controlada do compensador leva a operação deste como fonte de potência reativa controlada. Uma vez que a susceptância equivalente da topologia é proporcional a variação do ângulo de disparo ( $\alpha$ ), pode-se relacionar  $Q_{comp}$  com a susceptância do compensador e com o valor eficaz agregado da tensão de linha, conforme (10).

$$B_{comp}(\alpha) = \frac{-Q_{comp}}{3(V_{\Sigma})^2} \quad (10)$$

Nos cálculos que sucedem na malha de controle deseja-se obter a relação do ângulo de disparo com a susceptância do RCT. Como a susceptância do capacitor ( $B_c$ ) em paralelo com o RCT é fixa, pode-se determinar em (11) a susceptância do RCT ( $B_L$ ) que leva a potência reativa desejada para correção do fator de potência.

$$B_L(\alpha) = B_c - B_{comp}(\alpha) \quad (11)$$

Sabendo-se a susceptância máxima ( $B_{Lmax}$ ) do RCT, realiza-se em (12) a normalização de  $B_L$  com relação a susceptância máxima fixa do indutor do RCT.

$$B_{pu} = \frac{B_L}{B_{Lmax}} \quad (12)$$

Devido a transitórios que possam ocorrer durante as leituras de tensão e corrente, o valor de  $B_{pu}$  pode ultrapassar os limites naturais da faixa de operação.

Para tanto, utiliza-se um saturador para limitar o valor máximo de  $B_{pu}$  à unidade.

A malha de controle tem como função principal promover a atuação no sistema para correção do fator de potência, ação que será realizada controlando a condução dos tiristores, que são os meios de atuação no estágio de potência. A fim de adquirir o ângulo de disparo requerido para atuação dos tiristores, implementou-se a denominada *Lookup Table*, que na aplicação, compõe-se de uma aproximação de uma função matemática, no caso  $\alpha$  versus  $B_{pu}$ . Essa estrutura trata-se de um vetor experimental de 256 pontos, obtido a partir de ensaios em malha aberta, varrendo-se o ângulo de disparo dos tiristores para adquirir indiretamente os respectivos valores de susceptância do RCT. Tal relação pode ser observada na Figura 3.

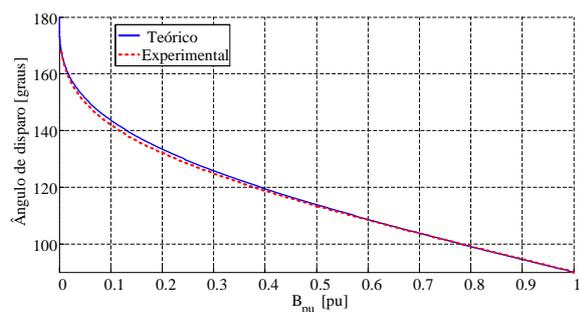


Figura 3. Gráfico de susceptância experimental para implementação do *Lookup Table*.

Na Figura 3, tratando-se da curva experimental adquirida por medições indiretas, o formato da mesma se deve ao fato da não idealidade do indutor que compõe o RCT, em que o mesmo apresenta perdas ativas devido à resistência ôhmica de seu enrolamento e perdas ativas em seu núcleo. O mesmo não ocorre na curva teórica, pois não é contabilizado o efeito das perdas na plotagem da mesma.

O *Lookup Table*, construído do gráfico experimental, apresenta na entrada valores de  $B_{pu}$  espaçados linearmente, e na saída os respectivos valores de ângulo de disparo. Portanto, tendo o valor de entrada  $B_{pu}$  obtido, executa-se uma operação de pesquisa para encontrar os valores de saída  $\alpha$  correspondentes. Tal processo ocupa pouco tempo de processamento do microcontrolador, solicitando mais recursos de memória deste.

Encontrado o valor do ângulo de disparo, o valor do mesmo é limitado por meio do bloco saturador, uma vez que a partir de  $175^\circ$  não há mudança significativa na susceptância do RCT. Por fim, o valor de  $\alpha$  é carregado em registradores de comparação de módulos de *PWM*, disponíveis em *hardware* no microcontrolador, para geração dos pulsos lógicos de disparo a serem enviados para o circuito de *gate drive*. Os pulsos de disparos, gerados pelos canais de *PWM*, são sincronizados pela borda de subida resultante de pulsos provenientes da saída de circuitos detectores de nível com histerese. Tais detectores são compostos por comparadores analógicos, que também inte-

gram os recursos de *hardware* disponíveis no microcontrolador.

#### 4 Especificações de Projeto e Resultados Experimentais

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos a partir do protótipo do *SVC*, com capacidade de compensação de potência reativa na faixa de 453,16 VAR indutivo à 3021,05 VAR capacitivo, operando em malha fechada de acordo com o sistema de controle digital para a correção do fator de potência fundamental via compensação de reativos. A tabela 1 resume as principais características do sistema elétrico no qual o *SVC* é aplicado.

Tabela 1. Característica do sistema

Simbologia	Descrição	Valores
$V_S$	Tensão de linha eficaz da fonte	220 V
$f_l$	Frequência fundamental	60 Hz
$P_{L_{max}}$	Potência ativa trifásica equivalente máxima da carga	1513 W
$Q_{L_{max}}$	Potência reativa trifásica equivalente máxima da carga	2627 VAR
$ S_{L_{max}} $	Módulo da potência aparente trifásica equivalente máxima	3331,6 VA
$fp$	Fator de potência equivalente da carga	0,499
$I_L$	Corrente eficaz de linha	7,96 A

Uma visão geral do protótipo do *SVC*, no qual o algoritmo de controle foi implementado, é apresentada na Figura 4, em que é possível visualizar as placas de processamento analógico para obtenção dos sinais de tensão e corrente, o microcontrolador aplicado para o desenvolvimento do controle digital do sistema, o circuito de *gate drive* e os tiristores montados em dissipador de alumínio, que integram os RCTs com os indutores, e os capacitores fixos do *SVC*.

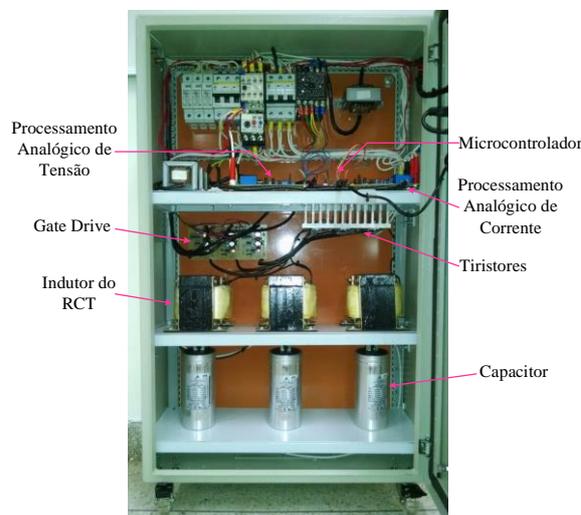


Figura 4. Visão geral do protótipo do *SVC*.

Na Figura 5 é possível observar com detalhe o condicionamento analógico de sinais composto pelas

placas de processamento analógico de tensão e corrente. Pode-se notar também o microcontrolador *PICCOLO TMS320C28069M* que integra o processamento digital de sinais.



Processamento Analógico de Tensão      Microcontrolador      Processamento Analógico de Corrente

Figura 5. Visão do processamento analógico e digital de sinais.

Para o desenvolvimento do sistema de controle embarcado ao SVC, são considerados os dados gerais apresentados na tabela 2, contendo as características dos filtros passa-baixas e *notch*.

Tabela 2. Dados para especificação do sistema de controle digital

Sistema	Parâmetro	Descrição	Valores
A/D	$f_s$	Frequência de amostragem	15,36 kHz
	$T_s$	Período de amostragem	65,10 $\mu$ s
	$G_{AD}$	Ganho do conversor A/D	4095/3,3
FPB	$Q_{FPB}$	Fator de qualidade	1/ $\sqrt{2}$
	$n$	Ordem do filtro	2 <sup>a</sup>
	$f_c$	Frequência de corte	6 Hz
	$k$	Ganho na banda passante	1
	$\omega_0$	Frequência angular de corte do FPB	37,7 rad/s
Filtro Notch	$Q_{1nth}$	Fator de qualidade do numerador	5
	$Q_{2nth}$	Fator de qualidade do denominador	5.10 <sup>4</sup>
Filtro Notch	$n$	Ordem do filtro	2 <sup>a</sup>
	$k$	Ganho na banda passante	1
	$f_n$	Frequência de ressonância do notch	60 Hz
	$\omega_n$	Frequência angular de ressonância do notch	376,99 rad/s

Os testes realizados para obtenção dos resultados experimentais foram focados no principal objetivo do compensador: a correção do fator de potência fundamental. Dessa forma, foram adquiridas as formas de onda experimentais utilizando instrumentos de medição trifásicos e, através de vetores carregados com os dados processados pelo sistema de controle, obtidos por meio do compilador *Code Composer*, versão 6.1.0 da *Texas Instruments*. Os vetores são importados para um *software* específico que proporciona uma melhor visualização gráfica do comportamento dinâmico das variáveis atuantes no sistema de controle.

A Figura 6 expressa a potência demandada pela carga no instante de medição do instrumento.

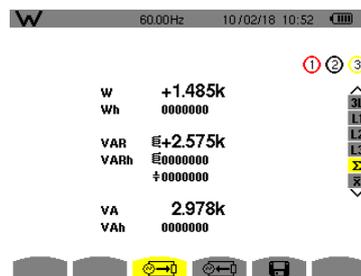


Figura 6. Tela da potência demandada pela carga.

A Figura 7 apresenta a tela do fator de potência medido pelo instrumento de medição, em que PF corresponde ao fator de potência global ( $fp$ ) e DPF representa o fator de potência fundamental ( $fp_1$ ).

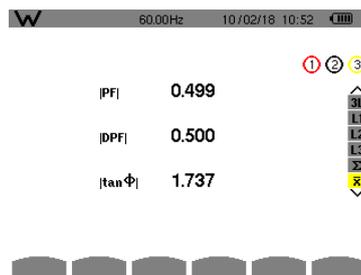


Figura 7. Tela do fator de potência da carga.

De acordo com a Resolução nº 456/2000 da ANEEL, o fator de potência mínimo de uma instalação elétrica industrial deve ser de 0,92. Dessa forma, foi definida a operação do algoritmo de controle do sistema microcontrolado com o valor de *set point* de fator de potência desejado igual a 0,92, de forma a compensar a energia reativa da carga e obter como resultado a regulação do fator de potência fundamental.

As formas de onda das tensões e correntes de carga, processadas pelo sistema de controle, bem como as potências ativa e reativa, serão expressas em função do número de amostras, tendo como base a frequência de amostragem de 15,36 kHz. Na Figura 8 é apresentada a forma de onda da tensão de linha processada pelo sistema de controle, juntamente com o comportamento do filtro *notch*.

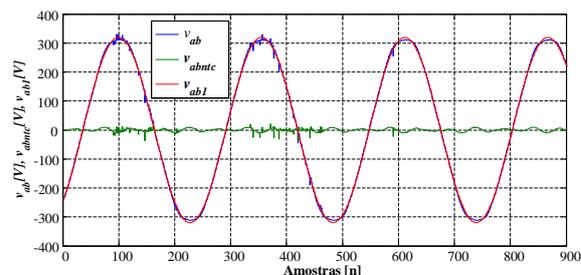


Figura 8. Tensão  $v_{ab}$  processada pelo sistema de controle.

Através do filtro *notch*, implementado digitalmente, é extraído da tensão de linha ( $V_{ab}$ ) as componentes harmônicas de tensão ( $V_{abmc}$ ), a fim de se obter a componente fundamental da tensão de linha ( $V_{ab1}$ ). O filtro atua estritamente na faixa de frequência de

60 Hz, resultando de sua saída a forma de onda  $v_{ab\_mc}[n]$ , composta pelas componentes harmônicas da tensão juntamente com os ruídos característicos de alta frequência, que subtraídos da tensão de entrada  $V_{ab}$  resultam na obtenção única da componente fundamental da tensão  $V_{abl}$ .

As correntes de carga processadas pelo sistema de controle são expressas na Figura 9. Avaliando-se as formas de onda, observa-se que as correntes de linha da carga apresentam conteúdo harmônico, fato relacionado às tensões de linha de laboratório que possuem distorção harmônica.

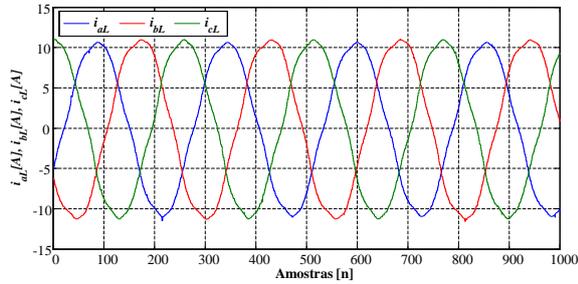


Figura 9. Correntes de carga processadas

Na Figura 10 é apresentada a resposta experimental da potência ativa  $p$  da carga, calculada instantaneamente de acordo com a Teoria p-q.

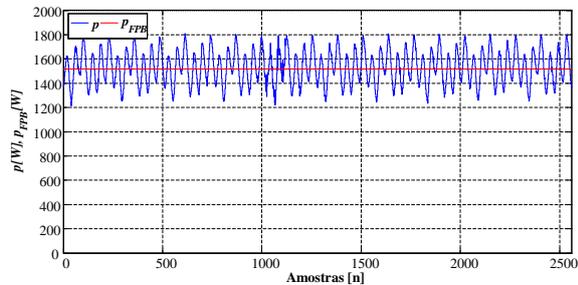


Figura 10. Potência ativa instantânea trifásica  $p[n]$  e potência ativa média  $p_{FPB}[n]$ .

Na Figura 11, também de acordo com a Teoria p-q, é expresso a resposta experimental do cálculo da potência reativa  $q$  calculada pelo algoritmo de controle.

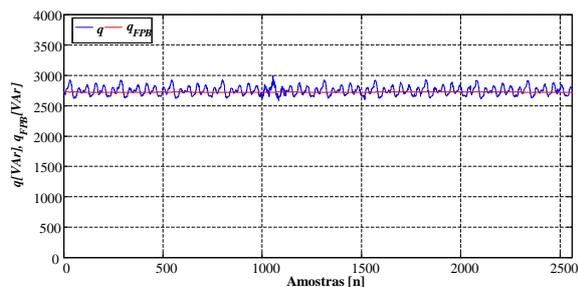


Figura 11. Potência reativa instantânea trifásica  $q[n]$  e potência reativa média  $q_{FPB}[n]$ .

Nas respostas experimentais de  $p$  e  $q$  a parcela oscilante se deve aos desbalanços e harmônicos ocasionados pelas correntes de carga, que refletem as condições não senoidais da forma de onda da tensão

advinda da fonte de alimentação. Assim, o cálculo das potências  $p$  e  $q$ , nesse regime de operação, resultam na parcela média esperada e na parcela oscilante.

As potências  $p$  e  $q$  são calculadas instantaneamente pelo algoritmo de controle, em seguida passam pelo filtro passa-baixas, a fim de se eliminar as parcelas oscilantes, para se obter somente o valor médio ( $p_{FPB}[n]$  e  $q_{FPB}[n]$ ). Tal comportamento é evidenciado nos resultados apresentados nas Figuras 10 e 11. Sendo as parcelas oscilantes de ordem superior a frequência de corte de 6 Hz do filtro, essas são atenuadas, restando somente a componente fundamental de sequência positiva, essencial para a correção do  $fp_i$ .

Obtido o valor médio das potências ativa e reativa demandada pela carga, o sistema de controle microcontrolado calcula a potência reativa que o SVC deve fornecer para a regulação do fator de potência, computando também a susceptância do RCT para realizar tal compensação. Posteriormente, o valor normalizado da susceptância do RCT é fornecido a entrada da *Lookup Table*, que responde com o equivalente valor do ângulo de disparo do tiristor. Na Figura 12 é expresso o resultado experimental do ângulo de disparo obtido através da *Lookup Table* no ponto de operação desejado.

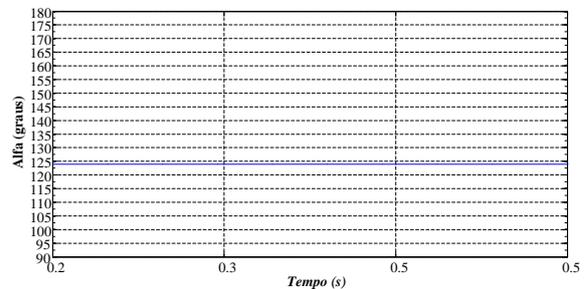


Figura 12. Ângulo de disparo obtido através da *Lookup Table*.

A operação do sistema de controle resultou na obtenção do ângulo de disparo requerido para a devida atuação do estágio de potência do SVC. Na Figura 13 pode-se observar a potência reativa de -1983 VAR que o SVC está fornecendo a carga.

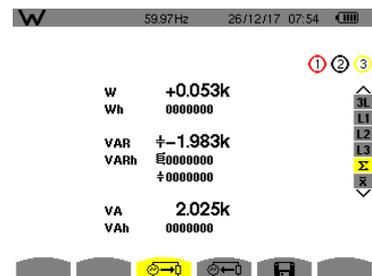


Figura 13. Tela das potências ativa consumida e reativa fornecida pelo SVC.

A potência referente a 53 W indica o processamento de potência ativa pelo SVC, ou seja, perdas em condução por efeito térmico.

A Figura 14 expressa a potência ativa e reativa do conjunto, carga e SVC, após a compensação da energia reativa demandada pela carga. Como espera-

do, a potência ativa resultante sofre um pequeno acréscimo devido as perdas em condução do SVC e, como resultado desejado, nota-se a grande redução da demanda de potência reativa solicitada pela carga.



Figura 14. Potência equivalente carga mais compensador.

O fator de potência fundamental da carga foi compensado, como pode-se observar na Figura 15, que expressa o resultado experimental do  $fp_1$  (DPF) e o  $fp$  (PF) do conjunto, obtido através do instrumento analisador de energia trifásico.

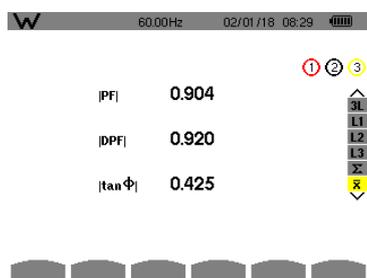


Figura 15. Resultado experimental do  $fp_1$  e  $fp$  do conjunto.

A distorção harmônica da corrente do SVC somada a corrente da carga causou uma considerável diminuição no fator de potência global, porém, este valor está próximo do fator de potência fundamental.

Na Figura 16 é apresentado o resultado experimental da tensão de fase e da corrente de linha resultante do conjunto.

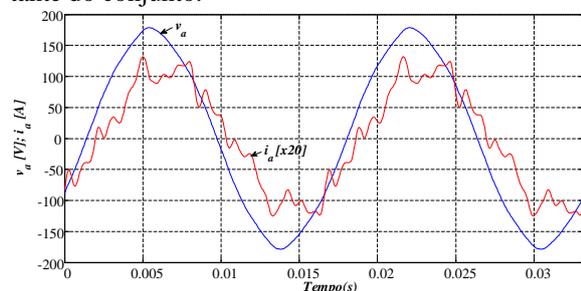


Figura 16. Forma de onda da tensão de fase e corrente de linha resultante do conjunto.

Ao analisar a corrente de linha  $i_a$ , oriunda da interação da corrente do SVC com a corrente de carga, é possível notar, mesmo sem obter a componente fundamental da mesma, que o deslocamento entre a tensão e a corrente está de acordo com o fator de potência fundamental, em torno de 0,920, calculado pelo instrumento de medição, como consta na Figura 15. Dessa forma, confirma-se através desses resultados, que houve a compensação da energia reativa demandada pela carga e que, mesmo com o conteúdo

harmônico inserido pelo SVC na corrente resultante, o  $fp$  se manteve próximo do  $fp_1$ . Ainda, é possível corrigir mais o  $fp$ , simplesmente alterando o valor de referência de  $fp_1$ .

Como pode ser observado na Figura 16, a corrente de linha  $i_a$  resultante do conjunto é distorcida, apresentando Distorção Harmônica Total de Corrente (DHT<sub>i</sub>) de 18%. Essa característica é ocasionada pela operação do SVC, que introduz correntes harmônicas que dependem do ângulo de disparo  $\alpha$ . Vale ressaltar que no protótipo em questão, o SVC está conectado em delta, configuração que impede que as correntes harmônicas múltiplas de três se propaguem pela rede. Ainda, mesmo com a característica citada, é possível diminuir a distorção de corrente resultante da operação do SVC pela conexão de filtros passivos sintonizados de potência, ou filtros ativos.

As correntes de linha, resultantes do conjunto carga mais SVC, são apresentadas na Figura 17. Em comparação com a Figura 9, que expressa somente as correntes de carga, é notável na Figura 17 a redução da amplitude das correntes resultantes, sendo um efeito da compensação advinda do equipamento por meio do desempenho do sistema de controle. Dessa forma, parte da energia reativa que a carga solicitava da fonte é agora fornecida pelo SVC.

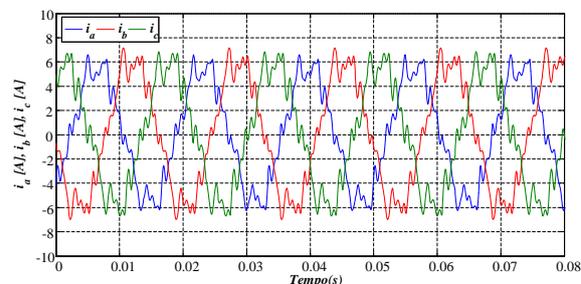


Figura 17. Correntes de linha resultantes do conjunto SVC e carga.

## 4 Conclusão

Os resultados experimentais mostraram-se satisfatórios. O sistema de controle automático microcontrolado foi capaz de atuar conforme requerido, mantendo a referência desejada com boa precisão, atuando no circuito de potência do SVC, compensando efetivamente a energia reativa demandada pela carga.

A aplicação da Teoria p-q no algoritmo de controle proporcionou a medição das potências ativa e reativa fundamentais através de um cálculo simples, ocupando pouca capacidade de processamento do microcontrolador, o que, aliado a aplicação da *Lookup Table*, resultou em uma ótima resposta no que se refere a compensação do fator de potência.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Jataí.

## Referências Bibliográficas

- (ANEEL, 2000) ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução ANEEL nº 456. Brasília: ANEEL, 2000.
- ANICETO, Diego Machado (2016). Importância da Correção do Fator de Potência nas Instalações Elétricas Industriais. Especialize. Goiânia, v. 1, n. 11, jul.
- AKAGI, Hirofumi; WATANABE, Edson Hirokazu; AREDES, Mauricio (2007). Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. IEEE PRESS.
- HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L (2000). "Understanding Facts: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems". IEEE Series on Power Engineering Society; Mohamed E. El-Hawary, Series Editor.
- IEEE Std 1459™ (2010). IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions.
- MIOTTO, Ednei Luiz (2010). Análise da Estabilidade Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência Multimáquinas com Dispositivos FACTS TCSC e Controladores Robustos. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina. [Orientador: Prof. Dr. Márcio Roberto Covacic].
- MOKHTARI, Maghsood; GOLSHANNAVAZ, S.; NAZARPOUR, D.; FARSADI, M. (2010). Control of an SVC for the load balancing and power factor correction with a new algorithm based on the power analysis. IEEE Xplore digital library. 9 November. ISSN 2167-2024.
- PASCHOARELI JR., Dionízio (2007). Introdução aos Sistemas Flexíveis & Controladores FACTS. DEE-FEIS/UNESP. São Paulo, abr. 2007.
- RIOS, Frederico S. R.; CURI, Gustavo S.; CHAVES, Fabricio S.; SILVA, Arlete V. da (2014). O Fator de Potência em Unidades Consumidoras Residenciais – e-xacta. Vol. 9 nº. 1 / maio.
- SILVA, Bruno Henrique Tenório; TAKEGAWA, Renato Candido; BELONI, Robson Celestino; LIMA, Wellington Melo de (2009). Consumo de Energia Reativa pelo Setor Residencial. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Sistemas Elétricos) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2009. [Orientador: Carlos Eduardo Maria Bédia].
- SZABÓ, Dominik; REGUL'A, Michal; BODNÁR, Roman; ALTUS, Juraj (2014). Control of a SVC

for Power Factor Correction. IEEE Xplore digital library. 8 July. ISBN 978-1-4799-3721-9.

WATANABE, Edson H.; BARBOSA, Pedro G.; ALMEIDA, Katia C.; TARANTO, Glauco N. (1998). Tecnologia FACTS – Tutorial. SBA Controle & Automação. Vol. 9 nº. 1 / jan.