

# ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O CONTROLE DIRETO E INDIRETO DE INJEÇÃO DE CORRENTE EM UM D-STATCOM

Antonio Carlos Borré, Amaury Simões Xavier, Flávio Gonçalves da Cruz Ribeiro,  
Maurício Aredes

Laboratório de Eletrônica de Potência, Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ  
CEP 21941-972, Cx.P. 68504, Rio de Janeiro – RJ – Brasil  
(borre, amaury, flavio, aredes)@coe.ufrj.br

**Resumo** – O D-STATCOM (Distribution Static Synchronous Compensator) é em sua essência uma fonte de tensão ac onde a magnitude, o ângulo de fase e a frequência da tensão de saída podem ser controlados. Entretanto, devido à sua conexão paralela, é um equipamento de injeção de corrente. Visando explorar esta dualidade, este artigo apresenta a comparação de dois modos distintos de controle realizados em um D-STATCOM baseado em um conversor fonte de tensão (VSC). O primeiro modo de controle atua na tensão de saída do conversor e o segundo age diretamente sobre a corrente a ser injetada. Nesse contexto, foi simulado um sistema elétrico onde o equipamento é inserido em paralelo com uma carga de 50 kVA a fim de regular a tensão na barra de carga ou corrigir o fator de potência. Foram inseridos componentes de quinto harmônico na corrente da carga, de forma a analisar o comportamento do equipamento.

**Palavras-Chave** – D-STATCOM, compensação de reativos, Teoria p-q, VSC

## COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN THE DIRECT AND INDIRECT CONTROL OF CURRENT INJECTION IN A D-STATCOM

**Abstract** – A Distribution Static Synchronous Compensator (D-STATCOM) is essentially an ac-voltage source where the magnitude, the phase angle and the frequency of the output voltage can be controlled. However, it is a current injection device due to its shunt connection. This duality is exploited in this paper to develop two different controls for D-STATCOM, based on voltage-sourced converter (VSC). The first control acts directly on the current to be injected and the second acts on the output voltage of the converter. In that context, an electric system was simulated where the equipment is shunt connected with a 50 kVA load in order to regulate the voltage on the load bus or to provide power factor correction. A load current distortion composed of fifth harmonic was inserted to analyze the behavior of the equipment.

**Keywords** - D-STATCOM, p-q Theory, Reactive Power Compensation, VSC

Artigo submetido em 31 de maio de 2005; primeira revisão em 10 de julho de 2005; segunda revisão em 26 de janeiro de 2006. Aceito por recomendação do Editor José Antenor Pomílio.

## I. INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica constitui um fator crucial para a competitividade de praticamente todos os setores industriais e dos serviços. Manter o nível de tensão, de fator de potência e de distorção harmônica dentro de certos limites operacionais aceitáveis, são metas perseguidas tanto pelos órgãos de fiscalização como também pelas concessionárias fornecedoras de energia.

As distribuidoras de energia elétrica vêm procurando atender às solicitações de seus consumidores, no que se refere à melhoria da qualidade do fornecimento. Nesse sentido, o D-STATCOM é um equipamento que apresenta grandes possibilidades em aplicações que visam à melhoria da qualidade de energia em sistemas de distribuição.

O STATCOM é um equipamento FACTS (Flexible AC Transmission System) [1] conectado em paralelo a um sistema de tensão trifásico, garantindo assim a compensação contínua da potência reativa, tanto indutiva como capacitiva. O controle de potência reativa pode ser empregado no controle do fluxo de potência ativa em uma linha de transmissão, na regulação de tensão ou na melhoria da estabilidade do sistema elétrico [2-3]. Os equipamentos FACTS são utilizados visando um maior controle do fluxo de potência e um carregamento seguro de linhas de transmissão a níveis próximos de seus limites térmicos.

Já o D-STATCOM é classificado como um equipamento Custom Power [4], dada a sua aplicabilidade em sistemas de distribuição, visando uma maior qualidade e confiabilidade da energia elétrica a ser entregue.

### A. Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento deste equipamento pode ser descrito através do esquema apresentado na Figura 1. O sistema elétrico e o D-STATCOM são representados respectivamente pelas fontes de tensão  $V_S$  e  $V_I$ . A reatância indicada por  $X_L$  representa a reatância equivalente entre as duas fontes [5]. É apresentado também, o diagrama fasorial das tensões, onde  $\delta$  é o ângulo de defasagem entre as tensões do sistema e do D-STATCOM.

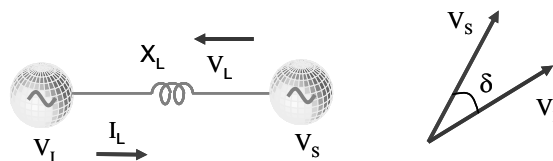


Fig. 1 Equivalente simplificado do D-STATCOM

Os fluxos de potência ativa e reativa entre as duas fontes de tensão, em regime permanente, podem ser descritos através das equações (1) e (2):

$$P = \frac{V_s V_L}{X_L} \cdot \sin \delta \quad (1)$$

$$Q = \frac{V_s^2}{X_L} - \frac{V_s V_L}{X_L} \cdot \cos \delta \quad (2)$$

Considerando as equações (1) e (2) e os diagramas fasoriais mostrados na Figura 2, têm-se as seguintes situações:

- Quando a tensão  $V_L$  está adiantada da tensão  $V_S$  ( $90^\circ < \delta < 0^\circ$ ), Figura 2 (a), existe um fluxo de potência ativa saindo do STATCOM em direção à rede;
- Quando a tensão  $V_L$  está atrasada da tensão  $V_S$  ( $-90^\circ < \delta < 0^\circ$ ), Figura 2 (b), existe um fluxo de potência ativa indo da rede em direção ao STATCOM;
- Quando a tensão  $V_L$  está em fase com a tensão  $V_S$  ( $\delta = 0^\circ$ ), Figura 2 (c) e, se  $|V_L| = |V_S|$ , não existe fluxo de potência ativa ou reativa;
- Quando a tensão  $V_L$  está em fase com a tensão  $V_S$  ( $\delta = 0^\circ$ ), Figura 2 (d) e, se  $|V_S| > |V_L|$ , não existe fluxo de potência ativa, entretanto, existe potência reativa indutiva;
- Quando a tensão  $V_L$  está em fase com a tensão  $V_S$  ( $\delta = 0^\circ$ ) Figura 2 (e) e, se  $|V_S| < |V_L|$ , não existe fluxo de potência ativa, entretanto, existe potência reativa capacitiva.

Como apresentado acima, o D-STATCOM é em sua essência uma fonte de tensão alternada e controlada. No entanto, devido à sua conexão paralela, é um equipamento de injeção de corrente. Deste modo, pode-se agir de duas formas distintas para realizar o controle de reativos: controlando-se a injeção de corrente de forma indireta, ou seja, agindo sobre a tensão na saída do conversor ou controlando a corrente diretamente. As seções seguintes apresentam essas duas estratégias de controle implementadas em um D-STATCOM baseado em um conversor fonte de tensão (VSC).

## II. CONTROLE INDIRETO DA INJEÇÃO DE CORRENTE

Este tipo de controle age sobre a tensão de saída do inversor  $V_L$ . Deste modo, a corrente que deve ser injetada pelo equipamento a fim de realizar a compensação reativa é controlada indiretamente. O controle do D-STATCOM é realizado de modo a fornecer uma referência de amplitude de  $V_L$  e da defasagem angular  $\delta$ . Assim, são gerados os sinais de tensão de referência que são comparados com uma portadora triangular (SPWM – Seno PWM).

No esquema da Figura 3 são mostradas as estruturas básicas que compõe o D-STATCOM e uma visão macroscópica do controle por referência de tensão, dividido em duas partes: o controle de chaveamento e o controle da magnitude e do ângulo de fase da tensão na saída do inversor.

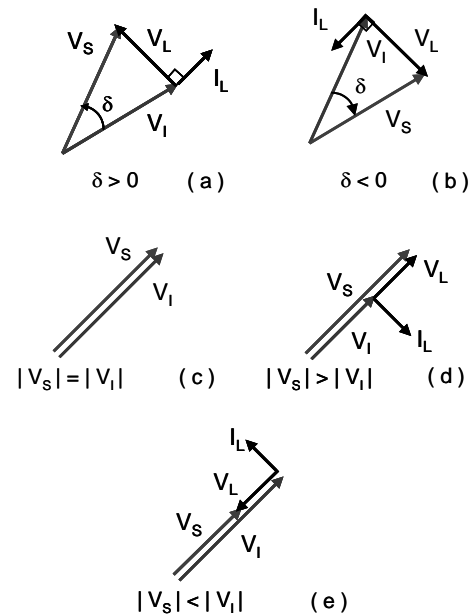


Fig. 2 Diagramas fasoriais de tensões e correntes

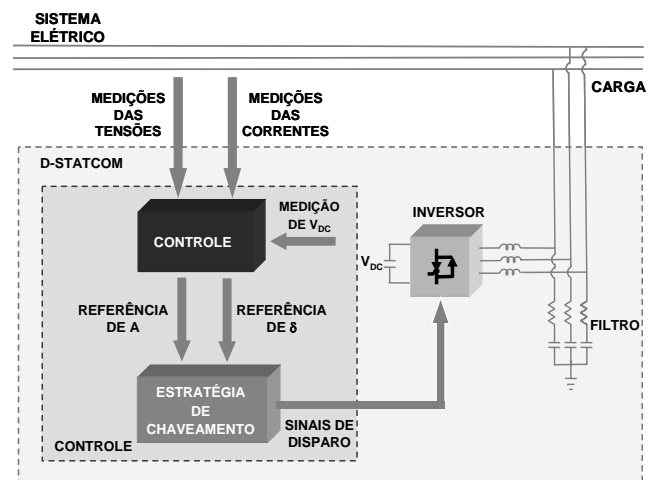


Fig. 3 D-STATCOM – controle indireto da injeção de corrente

A descrição apresentada a seguir segue a hierarquia do controle, desde as medições até os sinais de disparo do inversor.

### A. Transformações de Coordenadas Simplificadas

A Transformação de Clarke normalizada [6] é apresentada em (3) e (4) para tensões e correntes num sistema trifásico a três fios, respectivamente.

Para a otimização do controle são realizadas simplificações nas transformações apresentadas em (3) e (4), permitindo assim a redução do número de medições e do esforço computacional para a realização dos cálculos.

A intenção é utilizar apenas duas medições de tensão ou duas de corrente para obter suas componentes nas coordenadas  $\alpha$ - $\beta$ . Ao se realizar esta simplificação matemática, reduz-se o número de componentes do circuito de controle.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

Para realizar essas simplificações, fez-se uso de propriedades inerentes a sistemas trifásicos a três fios:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (5)$$

$$v_{ab} + v_{bc} + v_{ca} = 0 \quad (6)$$

Após algumas manipulações, tem-se:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{3} \cdot \begin{bmatrix} -\sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 \\ \sqrt{2}/2\sqrt{3} & -\sqrt{2}/2\sqrt{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

### B. Detector de Seqüência Positiva

As tensões do sistema são compostas principalmente de componentes de seqüência positiva, mas podem conter também componentes de seqüência negativa (desequilíbrios) e conter componentes harmônicas (distorções). A detecção da componente de seqüência positiva é fundamental para o correto funcionamento dos algoritmos de controle do D-STATCOM.

O controle detector de seqüência positiva ou detector de  $V_{+1}$  [7] é responsável por obter, a partir das tensões medidas no sistema, a componente fundamental de seqüência positiva.

O diagrama completo do controle detector de seqüência positiva é apresentado na Figura 4. Para a obtenção dessa componente é essencial ao controle de  $V_{+1}$  a presença de um PLL (Phase Locked Loop) para a obtenção da freqüência fundamental do sistema.

Como os sinais fictícios de corrente gerados pelo PLL ( $i'_\alpha$  e  $i'_\beta$ ) [7-8] são de seqüência positiva e sem distorções, pode-se dizer que somente a componente fundamental de seqüência positiva da tensão contribui para as parcelas constantes das potências ativa e reativa instantâneas [9-11]. Estas parcelas são obtidas após a filtragem dos sinais de  $p'$  e  $q'$ , obtidos pelas equações (9) e (10) respectivamente.

$$p' = v_\alpha i'_\alpha + v_\beta i'_\beta \quad (9)$$

$$q' = -v_\alpha i'_\beta + v_\beta i'_\alpha \quad (10)$$

São utilizados filtros do tipo passa-baixas para a retirada da parcela oscilante de  $p'$  e  $q'$ , de modo que na saída dos filtros, obtenha-se as parcelas constantes  $\bar{p}'$  e  $\bar{q}'$ .

Com os valores de  $\bar{p}'$  e  $\bar{q}'$ ,  $i'_\alpha$  e  $i'_\beta$  e de acordo com a expressão (11), obtêm-se o valor instantâneo da componente fundamental de seqüência positiva das tensões nas coordenadas  $\alpha$ - $\beta$ .

$$\begin{bmatrix} v'_\alpha \\ v'_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i'_\alpha & -i'_\beta \\ i'_\beta & i'_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{p}' \\ \bar{q}' \end{bmatrix} \quad (11)$$

É importante destacar que as correntes  $i'_\alpha$  e  $i'_\beta$  utilizadas no cálculo das potências real e imaginária  $p'$  e  $q'$  são correntes fictícias geradas pelo circuito de sincronismo (PLL), portanto as potências  $p'$  e  $q'$  também são fictícias e não apresentam nenhum sentido físico.

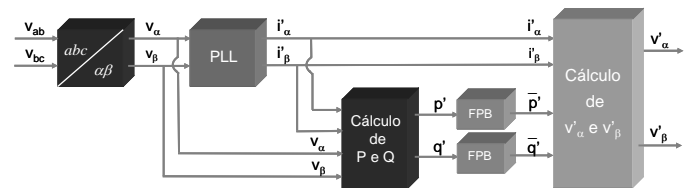


Fig. 4 Diagrama completo do detector de  $V_{+1}$

### C. Controle da defasagem angular $\delta$

A defasagem angular  $\delta$  é a principal responsável pelo fluxo de potência ativa que controla a tensão no capacitor do D-STATCOM [12].

A função do capacitor é servir como fonte de tensão contínua possibilitando a atuação do inversor. O capacitor serve também como acumulador temporário de energia, permitindo trocas entre o sistema elétrico e o STATCOM.

Para que se mantenha um nível de tensão adequado à composição da tensão  $V_1$ , introduz-se um controlador PI (proporcional-integral), cuja entrada é a diferença entre a tensão medida no capacitor e um valor de referência, neste caso, 450 V. A saída é a diferença do ângulo de fase das tensões  $V_S$  e  $V_1$ , ou seja, o ângulo  $\delta$ .

### D. Controle da Amplitude (A)

A amplitude (A) da tensão  $V_1$  é a principal responsável pela compensação de potência reativa, tanto indutiva quanto capacitiva [11]. Ela pode ser controlada de modo a regular a tensão na barra controlada ou corrigir o fator de potência.

Quando deseja-se regular a tensão, utiliza-se as tensões de seqüência positiva nas coordenadas  $\alpha$ - $\beta$ , obtêm-se o valor eficaz coletivo da tensão na rede [7], apresentado em (12):

$$|v'_\Sigma| = \sqrt{v_\alpha'^2 + v_\beta'^2} \quad (12)$$

Compara-se a tensão eficaz com um valor de referência desejado e aplica-se um controlador PI, tendo como resultado a amplitude (A) da tensão na saída do inversor, necessária à compensação de reativos.

No entanto, quando se deseja corrigir o fator de potência, torna-se necessário anular a potência reativa da fonte. Para isso, são medidos os valores instantâneos das tensões na barra e das correntes na fonte, e baseado na Teoria p-q, determina-se a parcela média da potência reativa instantânea, a qual deve ser anulada. Faz-se uso de um controlador PI para a obtenção da amplitude A.

A Figura 5 apresenta de forma detalhada o controle do ângulo de defasagem angular  $\delta$  e do controle da amplitude (A).

### E. Obtenção das Tensões de Referência

A partir da amplitude de A, do ângulo de fase  $\delta$  e da frequência angular determinada pelo PLL, obtém-se as tensões de referência necessárias aos controles descritos nessa seção.

### F. Estratégia de Chaveamento

Para completar o algoritmo de controle do D-STATCOM, faz-se a comparação das tensões de referência com uma portadora triangular, gerando os pulsos de disparo necessários ao chaveamento (SPWM). Utilizou-se esse tipo de modulação a fim de simplificar o algoritmo de controle a ser implementado em DSP (*Digital Signal Processor*), pois neste caso, torna-se desnecessária a medição da tensão nos terminais do D-STATCOM.

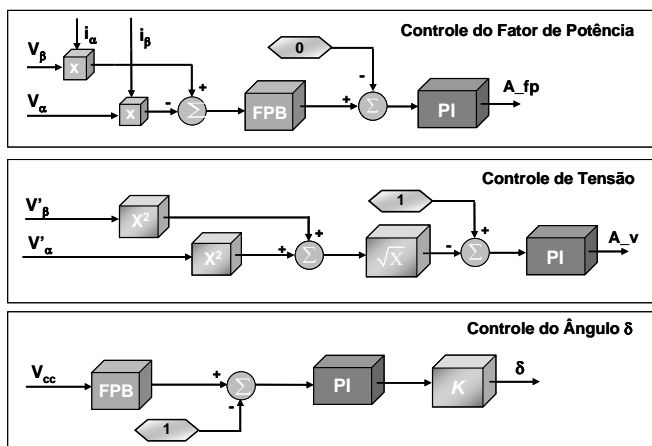


Fig. 5 Diagrama em blocos para o controle do ângulo  $\delta$  e da amplitude A

## III. CONTROLE DIRETO DA INJEÇÃO DE CORRENTE

Este tipo de controle age diretamente na corrente a ser injetada pelo equipamento, a fim de realizar a compensação reativa.

A Figura 6 apresenta a estrutura básica do D-STATCOM controlado por corrente. Essa estratégia assemelha-se ao controle indireto da corrente no que tange à transformação de coordenadas e à obtenção da componente fundamental de sequência positiva.

O controle de corrente implementado é baseado na Teoria p-q, onde através das referências de potência real e imaginária instantâneas é capaz de se chegar às correntes de compensação necessárias à regulação de tensão na barra de carga ou à correção do fator de potência.

### A. Controle de p

A parcela média da potência real instantânea é responsável pelo controle da tensão no capacitor do D-STATCOM. Para que se mantenha um nível de tensão no capacitor adequado à composição das correntes de referência, introduz-se um controlador PI, cuja entrada é a diferença entre a tensão medida no capacitor e um valor de referência. A saída é a componente média da potência ativa instantânea a ser drenada pelo D-STATCOM.

Este valor de potência ativa é em geral mínimo, necessário

apenas ao suprimento de perdas no circuito do D-STATCOM, já que o fornecimento de potência unicamente reativa pelo equipamento não altera a tensão do capacitor CC.

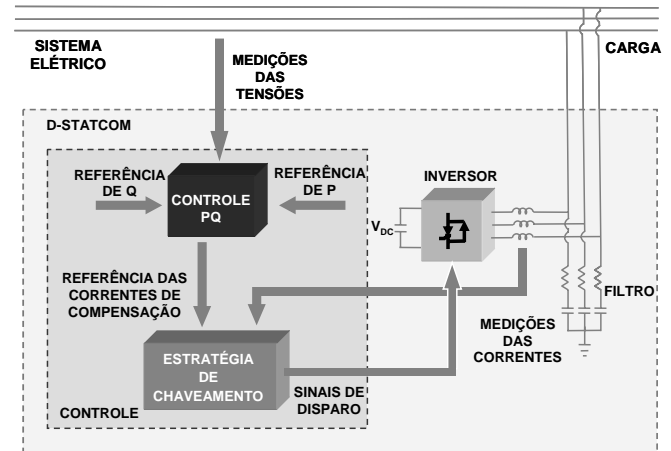


Fig. 6 D-STATCOM – controle direto da injeção de corrente

### B. Controle de q

A parcela média da potência imaginária instantânea é controlada de modo a regular a tensão na barra de carga ou corrigir o fator de potência.

Para a regulação da tensão, compara-se o valor eficaz da tensão obtida em (12) com um valor de referência desejado e aplica-se em um controlador PI, tendo como resultado a potência reativa a ser compensada. Em regime permanente, o valor RMS da tensão será igual ao valor de referência e a saída do PI corresponderá à potência reativa de compensação.

Para a correção do fator de potência, utilizam-se as correntes medidas na carga e as tensões na barra à qual o D-STATCOM é conectado. Aos quatro sinais medidos no circuito de potência  $[v_{ab}(t), v_{bc}(t), i_b(t), i_c(t)]$  aplica-se a transformada de Clarke simplificada.

A partir destes valores nas coordenadas  $\alpha$ - $\beta$ , calcula-se pela equação (13) o valor da potência reativa instantânea consumida pela carga [6-8].

$$q = -v_{\alpha}i_{\beta} + v_{\beta}i_{\alpha} \quad (13)$$

Como o objetivo é o controle do fator de potência, o valor da potência reativa instantânea calculada q precisa ser aplicada a um filtro passa-baixas, a fim de obter o valor médio da mesma, ou seja,  $\bar{q}$ .

A potência reativa a ser fornecida pelo D-STATCOM deve ser tal que, o valor da potência compensada conduza a um fator de potência unitário, ou seja, o equipamento deve fornecer toda potência reativa requerida pela carga.

A Figura 7 apresenta o diagrama em blocos para o controle da potência real instantânea p e da potência imaginária q, tanto para a regulação de tensão quanto para o controle do fator de potência.

### C. Cálculo das Correntes de Referência

Após a determinação das potências instantâneas ativa e reativa, pelo controle de tensão no capacitor e pelo controle de tensão na barra ou fator de potência, basta aplicar a equação (14) para proceder ao cálculo das correntes de referência nas coordenadas  $\alpha$ - $\beta$  [6-8].

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha ref} \\ i_{\beta ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}'^2 + v_{\beta}'^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha}' & v_{\beta}' \\ v_{\beta}' & -v_{\alpha}' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \end{bmatrix} \quad (14)$$

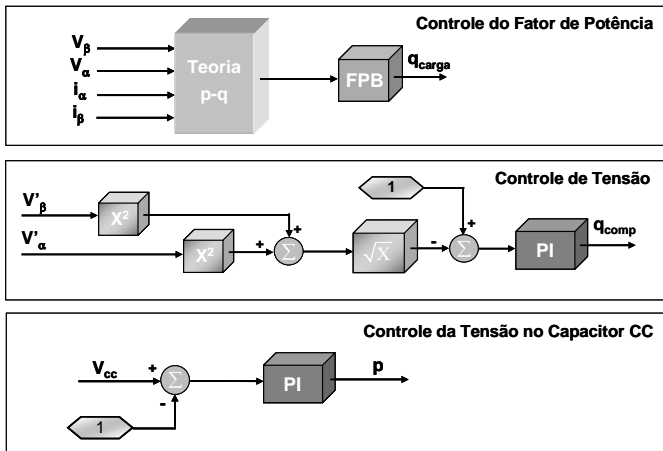


Fig. 7 Diagrama em blocos para o controle de  $p$  e  $q$

#### D. Estratégia de Chaveamento

A partir do cálculo das correntes de referência, necessita-se de um controle que gere os pulsos de disparo para o inversor, de modo a obter no sistema as correntes capazes de regular o módulo da tensão na barra ou corrigir o fator de potência.

Para isso pode-se utilizar desde o simples controle por bandas de histerese ao complexo *Space Vector Modulation*. Neste caso utilizou-se o controle vetorial de corrente, como apresentado no diagrama da Figura 8.

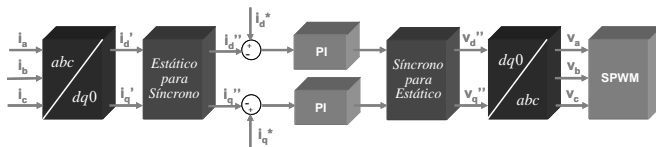


Fig. 8 Diagrama em blocos do controle vetorial de corrente

### IV. SISTEMA SIMULADO

O objetivo desta seção é apresentar o desenvolvimento e a simulação de um modelo digital do D-STATCOM no programa de transitórios eletromagnéticos PSCAD<sup>®</sup>/EMTDC<sup>™</sup>.

Foi considerado que o D-STATCOM está ligado a um barramento infinito conectado a uma reatância, representando o equivalente Thèvenin do sistema CA, simplificando a modelagem e colocando em foco o estudo do compensador. Este equivalente de Thèvenin alimenta uma carga que pode assumir um comportamento ora indutivo, ora capacitivo. A Figura 9 apresenta o sistema elétrico em questão.

Nesse mesmo sistema, foram introduzidas componentes de quinto harmônico na corrente da carga, a fim de comparar a eficiência dos dois tipos de controle propostos frente à cargas não-lineares.

#### A. Definição do Sistema Elétrico

Nas simulações foi utilizado um sistema CA com tensão nominal de 220 V e potência de curto circuito ( $S_{cc}$ ) igual a 250 kVA. Com estes dados, foi calculada a impedância de

curto-circuito, que é a impedância equivalente de Thèvenin para o sistema.

Com os valores de  $V_n = 220$  V e  $S_{cc} = 250$  kVA, o resultado para  $X_{th}$  é 0,194  $\Omega$ . A impedância equivalente para o sistema foi modelada por uma indutância de 0,0005 H, que representa  $X_{th}$  na frequência de 60 Hz.

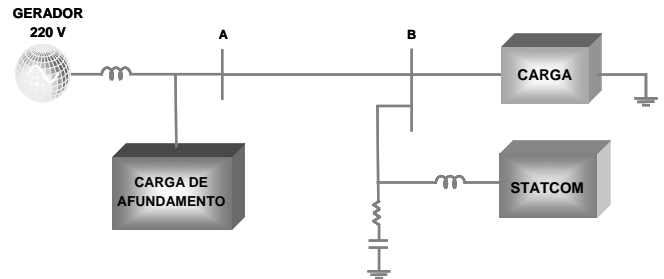


Fig. 9 Sistema elétrico utilizado

Utilizando como valores base a potência de 50 kVA e a tensão de 220 V, obtém-se uma corrente base igual a 131,22 A e uma impedância base igual a 0,968  $\Omega$ .

O afundamento de tensão foi simulado a partir de uma falta trifásica através de reatores, de modo a provocar uma queda de tensão de aproximadamente 20% da tensão base. Para isso, foi dimensionada uma reatância indutiva de 1,131  $\Omega$  por fase.

A carga inserida ao sistema foi dimensionada de tal forma a apresentar um fator de potência 0,85 capacitivo ou indutivo. Para isso, foi utilizada como carga indutiva uma impedância  $Z_L = (0,823 + j 0,510) \Omega$  e como carga capacitiva, uma impedância  $Z_C = (0,823 - j 0,510) \Omega$ .

### V. RESULTADO DAS SIMULAÇÕES

A fim de comprovar a eficácia do equipamento quanto à compensação de reativos e quanto ao suporte de tensão devido a afundamentos e inserções de cargas capacitivas e indutivas, foi utilizado o sistema esquematizado na Figura 9.

As simulações têm uma duração de 1,6 s e o STATCOM é programado para ser conectado em  $t = 0,2$  s. A carga indutiva é mantida ligada até o instante  $t = 1,2$  s, quando então, é substituída por uma capacitiva de modo a simular uma sobretensão. Durante o intervalo compreendido entre  $0,6 \text{ s} \leq \Delta t \leq 0,8 \text{ s}$  é inserido a carga que simula o afundamento de tensão de curta duração no sistema.

As Figuras 10 (a) e (b) apresentam os resultados para a tensão  $V_{RMS}$  e para o fator de potência sem que o equipamento esteja conectado ao sistema. Percebe-se que a tensão sem o uso do D-STATCOM varia de acordo com os eventos simulados e não permanece no valor desejado de 220V, assim como o fator de potência que fica sempre abaixo do exigido por norma (0,92).

Nas seções subseqüentes são apresentados os resultados de simulação de acordo com o tipo de regulação desejada: tensão ou fator de potência.

#### A. Regulação da tensão $V_{RMS}$

O perfil da tensão  $V_{RMS}$  é mostrado nas Figuras 11 (a) e (b), tanto para o D-STATCOM utilizando controle direto como indireto de injeção de corrente. Observa-se que a ten-

são regulada em 220V em ambos os casos. O controle indireto de corrente se mostrou mais oscilante, enquanto o controle por referência de corrente apresentou maiores erros (*overshoot*). Tal comportamento está relacionado com o fato da não obtenção da função de transferência do modelo em estudo, sendo os ganhos dos controladores ajustados de forma empírica.

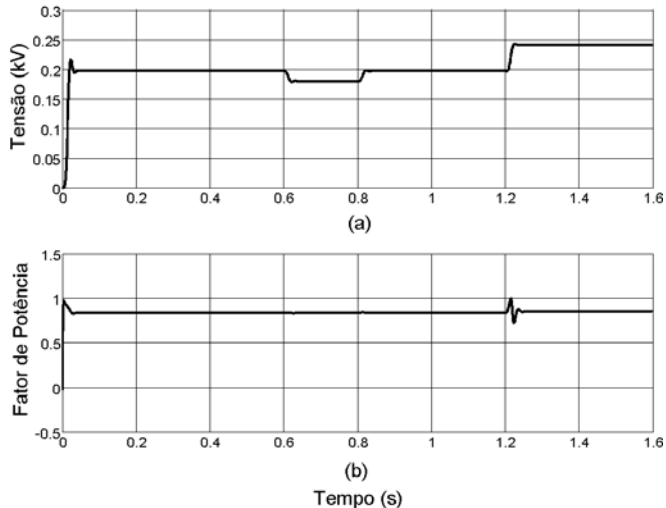


Fig. 10 (a) Tensão  $V_{RMS}$  sem o D-STATCOM  
(b) Fator de potência sem o D-STATCOM

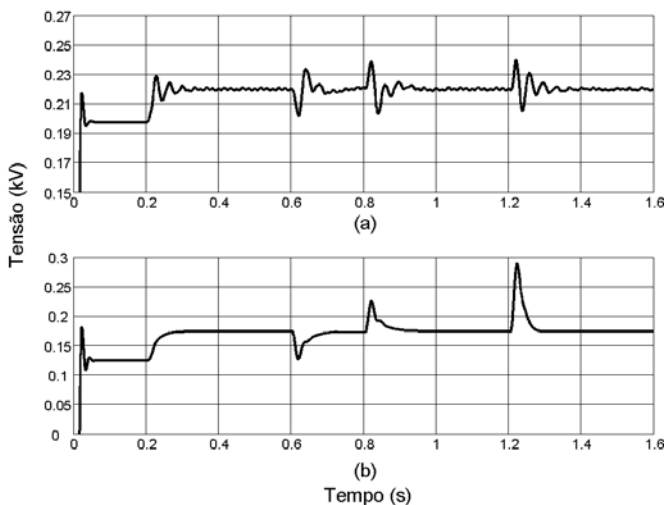


Fig. 11 (a) Tensão  $V_{RMS}$  controlada por referência de tensão  
(b) Tensão  $V_{RMS}$  controlada por referência de corrente

#### B. Correção do fator de potência

O fator de potência é mostrado nas Figuras 12 (a) e (b). Novamente os dois tipos de controle se mostram eficientes, embora o controle direto de injeção de corrente se mostre mais eficaz.

#### C. Regulação da tensão $V_{DC}$ no capacitor

De acordo com a Figura 13, observa-se que ao se controlar o D-STATCOM por tensão, ou seja, de forma indireta, a tensão no capacitor oscila bem mais do que quando o mesmo é controlado por corrente. Isto se deve ao fato do controle indireto ser mais lento, já que age sobre o ângulo de defasagem  $\delta$  para controlar a tensão no capacitor.

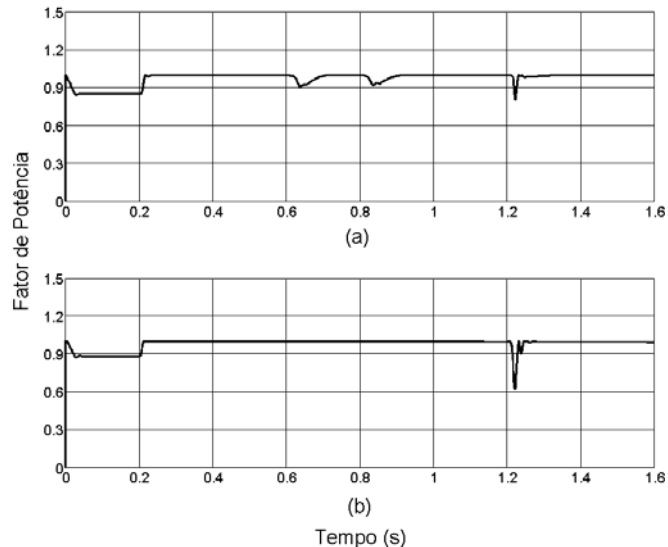


Fig. 12 (a) Fator de potência controlado por referência de tensão  
(b) Fator de potência controlado por referência de corrente

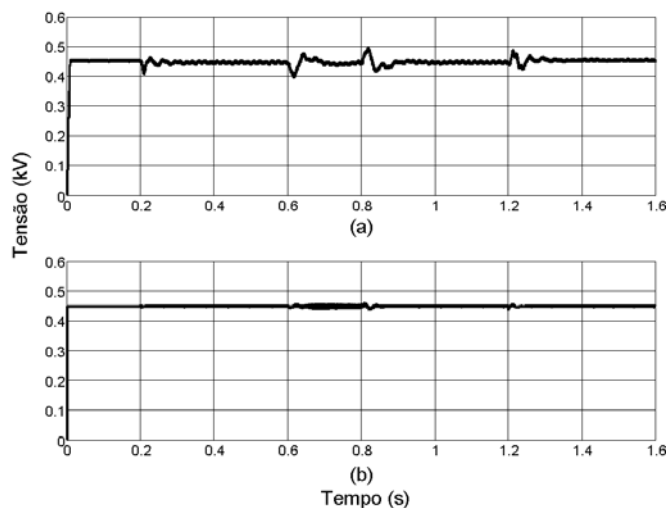


Fig. 13 (a) Tensão  $V_{DC}$  utilizando referência de tensão  
(b) Tensão  $V_{DC}$  utilizando referência de corrente

#### D. Inserção de componentes harmônicas na carga

Foram introduzidas componentes de quinto harmônico na corrente da carga com amplitude igual a 5% da corrente base. As Figuras 14 e 15 apresentam os perfis da corrente da fonte, da carga e a sintetizada pelo D-STATCOM, considerando a utilização do controle indireto e direto de injeção de corrente, respectivamente. A Figura 14 mostra que o D-STATCOM controlado como fonte de tensão (controle indireto de injeção de corrente) oferece um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas que fluem em quase sua totalidade para o equipamento. Em outras palavras, o D-STATCOM controlado por referência de tensão atua como um filtro ativo, oferecendo baixa impedância às correntes harmônicas, limitadas apenas ao baixo valor da indutância de comutação associada ao inversor do STATCOM, conforme mostra a Figura 3.

Os espectros harmônicos para as correntes (Figuras 16 e 17) confirmam o comportamento de “filtro ativo” para o D-STATCOM com controle por referência de tensão.

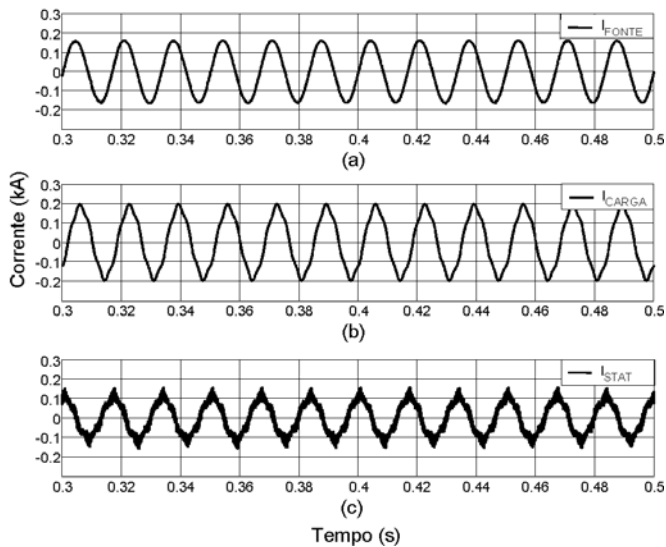


Fig. 14 (a) Corrente da fonte (b) Corrente da carga (c) Corrente sintetizada utilizando o controle indireto

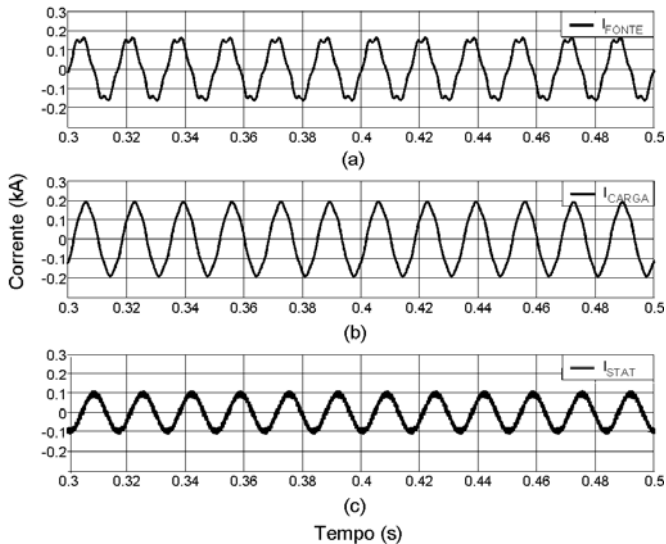


Fig. 15 (a) Corrente da fonte (b) Corrente da carga (c) Corrente sintetizada utilizando o controle direto

Observa-se na Figura 17 que a componente de quinto harmônico inserida na carga e suas demais componentes são amplificadas no sistema [13]. Em contrapartida, quando controlado por tensão (Figura 16), as correntes harmônicas fluem em direção ao equipamento, afetando de forma quase insignificante o sistema elétrico.

A Tabela I apresenta a distorção harmônica total das correntes:

**TABELA I**  
**Distorção Harmônica Total (DHT)**  
DHT (%)

|               | Controle Indireto | Controle Direto    |
|---------------|-------------------|--------------------|
| $I_{FONTE}$   | 2,02              | $I_{FONTE}$ 10,35  |
| $I_{CARGA}$   | 6,84              | $I_{CARGA}$ 4,18   |
| $I_{STATCOM}$ | 11,02             | $I_{STATCOM}$ 6,37 |

## VI. CONCLUSÕES

Foram apresentadas duas estratégias de controle para um D-STATCOM, as quais foram denominadas por controle di-

reto e indireto de injeção de corrente. No controle direto, o D-STATCOM é controlado por referência de corrente, enquanto que no indireto, o mesmo é controlado por referência de tensão.

O circuito de controle do D-STATCOM quando controlado por corrente é mais complexo do que quando controlado por tensão. Além disso, o controle por corrente necessita também de um número maior de medições de corrente, ou seja, além da tensão na barra controlada, da corrente na carga e da medição da tensão CC, é necessário medir a corrente sintetizada pelo inversor.

Por atuar diretamente na corrente, a resposta do D-STATCOM com o controle direto é menos oscilante.

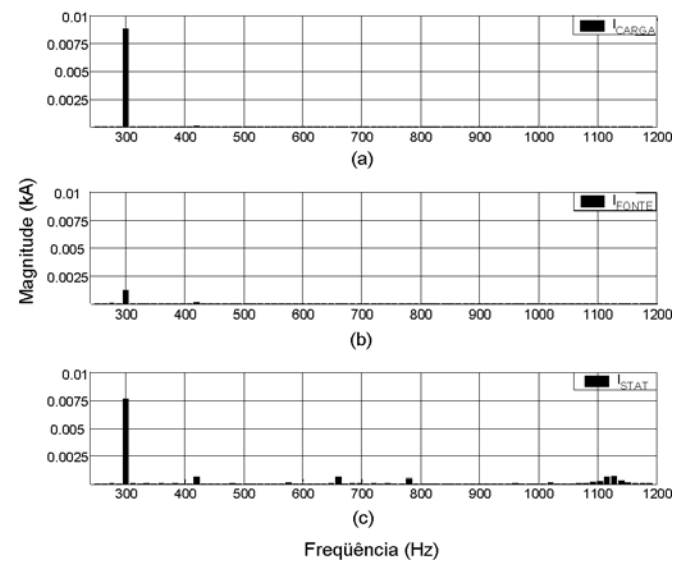


Fig. 16 Espectro harmônico para a corrente da carga, da fonte e do inversor utilizando o controle indireto

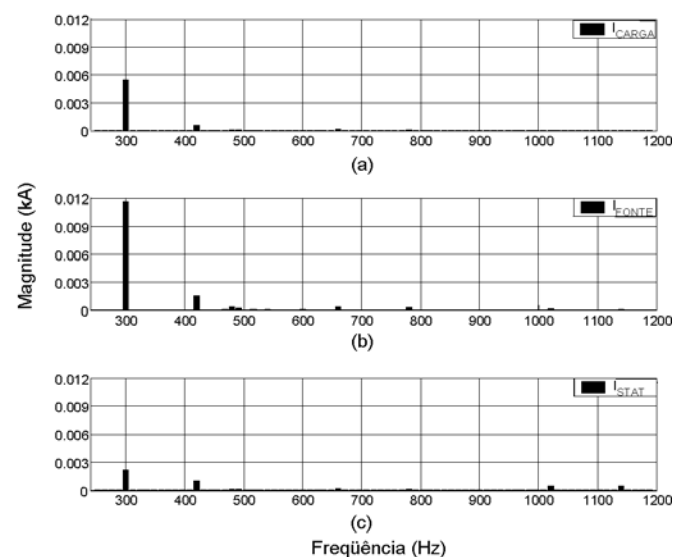


Fig. 17 Espectro harmônico para a corrente da carga, da fonte e do inversor utilizando o controle direto

Apesar de em ambos os casos o controle de reativos ser feito através de um conversor fonte de tensão (VSC), este é visto pelo sistema como se fosse uma fonte de corrente, quando controlado de forma direta. Como resultado, as com-

ponentes harmônicas presentes na corrente de carga encontram a fonte como único caminho para fluir. Em alguns casos, devido a efeitos ressonantes, essas componentes podem até ser amplificada, causando distorções ainda maiores.

A grande vantagem do D-STATCOM controlado por tensão é a capacidade do mesmo funcionar como filtro para correntes harmônicas provocadas por cargas não-lineares. Neste caso, o D-STATCOM sempre será o caminho de menor impedância para estas correntes. Neste caso, a indutância de comutação é um parâmetro importante no projeto do D-STATCOM. Ao se utilizar o controle indireto, é desejável uma baixa reatância de comutação, uma vez que, quanto menor o seu valor, maior será a capacidade de drenar correntes harmônicas. Ao se utilizar o controle direto, necessita-se de um valor um pouco maior para esta reatância, já que, ao se atuar diretamente sobre a corrente que por ela flui, o chaveamento do conversor gera uma maior distorção.

Para fins de implementação em microcontroladores, o D-STATCOM controlado por referência de tensão, torna-se mais vantajoso por possuir um algoritmo de controle mais simplificado e um número reduzido de medições frente ao equipamento controlado por referência de corrente.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. G. Hingorani, "Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems", *Proceedings of the IEEE*, vol. 76, no. 4, April 1988.
- [2] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, "Understanding FACTS – Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", *IEEE Press*, New York, 1999.
- [3] S. Mori, et al., "Development of a Large Static Var Generator Using Self-Commutated Inverters for Improving Power Systems Stability," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 8, no. 1, pp. 371-377, Feb. 1993.
- [4] Hingorani, N.G.; "Introducing Custom Power", *IEEE Spectrum*, pp. 41-48, June 1995.
- [5] C. A. C. Cavaliere, "Análise do STATCOM operando em sistemas desbalanceados", Tese de Mestrado, *COPPE/UFRJ*, 2001.
- [6] E. Clarke, "Circuit Analysis of A-C Power Systems", 2 vols. General Electric Co., Schenectady, New York, 1950.
- [7] M. Aredes, "Active Power Line Conditioners," Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) Thesis, Technische Universität Berlin, March 1996.
- [8] E. M. Sasso et al., "Investigação dos Modelos de Circuitos de Sincronismo Trifásicos Baseados na Teoria das Potências Real e Imaginária Instantâneas (p-PLL e q-PLL)", *XIV Congresso Brasileiro de Automática*, pp. 480-485, Setembro 2002.
- [9] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits", *International Power Electronics Conference*, pp. 1375-1386, Tokyo, 1983.
- [10] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components", *IEEE Transactions on Industrial and General Applications*, vol. IA-20, no. 3, pp. 625-630, 1984.
- [11] E. H. Watanabe, M. Aredes, R. M. Stephan, "New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 697-703, April 1993.
- [12] X.-P. Zhang, E. Handschin, M. Yao, "Multi-control Functional Static Synchronous Compensator (STATCOM) in Power System Steady-state Operations", *Electric Power Systems Research*, vol. 72, no. 3, pp. 269-278, December 2004.
- [13] Y. Ye, M. Kazerani, V. H. Quintana, "Current-Source Converter Based STATCOM: Modeling and Control", *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 795-800, April 2005.

#### DADOS BIOGRÁFICOS

**Antonio Carlos Borré** nasceu em 10/04/1977 em Petrópolis, é Engenheiro Eletricista (2003), formado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Atualmente, faz parte do grupo de Eletrônica de Potência da COPPE/UFRJ onde entrou em 2004 na condição de Mestrando em Engenharia Elétrica.

Suas áreas de interesse são: qualidade de energia, sistemas HVDC e controles industriais.

**Amaury Simões Xavier** nasceu em Petrópolis no dia 15 de maio de 1981. Tornou-se Engenheiro Eletricista em 2004 pela Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. No mesmo ano entrou para o grupo de Eletrônica de Potência da COPPE/UFRJ onde atualmente busca o título de Mestre em Engenharia Elétrica e está engajado em projetos de pesquisas e desenvolvimento na área de qualidade de energia e FACTS.

**Flávio Gonçalves da Cruz Ribeiro** nasceu em Nova Iguaçu, no Estado do Rio de Janeiro, no dia 07 de setembro de 1980. Tornou-se Engenheiro Eletricista em 2005 pela Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. No mesmo ano, ingressou no grupo de Eletrônica de Potência da COPPE/UFRJ onde atualmente busca o título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Suas áreas de interesse são: qualidade de energia e equipamentos FACTS.

**Maurício Aredes** nasceu em 1961. Tornou-se Engenheiro Eletricista em 1984 pela Universidade Federal Fluminense, Niterói - RJ. Em 1991, recebeu o título de M.Sc. em Engenharia Elétrica pela UFRJ. Em 1996, tornou-se Dr.-Ing. (Hons.) pela Technische Universität Berlin, Berlim-Alemanha. Atualmente, é Professor adjunto da Universidade Federal do Rio de Janeiro onde ensina Eletrônica de Potência. De 1985 a 1997, foi Engenheiro de P&D, do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), Rio de Janeiro.

Suas áreas de pesquisas incluem sistemas HVDC, FACTS, filtros ativos, custom power e qualidade de energia.