

# UM TAP HVDC COM FLUXO BIDIRECIONAL DE ENERGIA

Antonio Carlos Borré, Edisio Alves de Aguiar Júnior, 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, edisio, aredes)@coe.ufrj.br

**Resumo** - Com a crescente demanda por energia elétrica, os sistemas HVDC tendem a assumir um papel cada vez mais importante no cenário mundial. No entanto, a extração ou injeção de pequenos blocos de energia ao longo de linhas HVDC constitui-se em um problema bastante complexo, devido a sua característica de transmissão *ponto-a-ponto*. Este estudo apresenta uma nova topologia para o Tap HVDC, bidirecional em energia, permitindo a conexão tanto de consumidores quanto de geradores ao sistema HVDC, de forma a realizar intercâmbio de energia com este. A fim de comprovar a eficiência do equipamento no que se refere ao dreno e a injeção de potência ao longo da linha, modelou-se um sistema simplificado no qual o Tap terá seus terminais conectados a uma fonte de corrente e ao potencial de terra. A ferramenta computacional utilizada para simulação foi o software de transientes eletromagnéticos PSCAD/EMTDC.

**Palavras-Chave** – Transmissão em corrente contínua, Sistemas HVDC, Tap HVDC.

## HVDC TAP WITH BIDIRECTIONAL POWER FLUX

**Abstract** – With the increase of electricity demand HVDC systems tend to play a role of increasing importance in worldwide scene electric systems. However, the extraction or injection of small energy blocks along the HVDC line consists in a sufficiently complex problem, due to its *point-to-point* transmission characteristic. This study presents a new topology for a HVDC Tap, allowing bidirectional energy flow that offers the possibility of connecting consumers as well as generators to the HVDC system. For verifying the equipment efficiency, in draining and injecting power, the HVDC Tap was developed and tested in a simplified model of HVDC system, where the equipment terminals were connected to a current source and ground. Simulation results were obtained using the electromagnetic transients program PSCAD/EMTDC.

**Keywords** – DC transmission, HVDC Systems, HVDC Tap.

Artigo submetido em 03/02/2009. Revisões em 26/04/2009 e 05/10/2009.  
Aceito por recomendação do editor Fernando L. M. Antunes.

## I. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país com um potencial hidráulico estimado em cerca de 260 GW. No entanto, grande parte desse potencial encontra-se ainda inexplorado e muito afastado dos grandes centros consumidores, localizando-se, sobretudo na Região Norte. Tendo em vista os novos projetos de geração de energia, entre eles os Complexos de Belo Monte e do Rio Madeira, um considerável acréscimo de energia (17,6 GW) estará disponível nos próximos anos. Para o transporte e o consequente aproveitamento dessa energia serão necessárias longas linhas de transmissão, conforme pode ser observado na Figura 1.

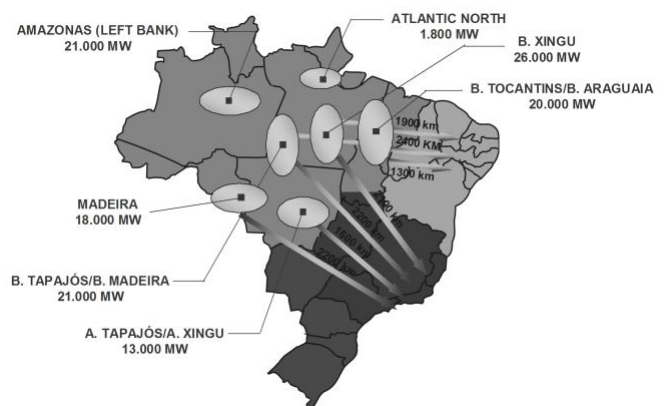


Fig. 1 Potenciais hidráulicos a serem explorados.

Os sistemas de transmissão existentes são em sua quase totalidade abastecidos com tensões alternadas, salvo em algumas exceções, onde são utilizados sistemas HVDC (*High Voltage Direct Current*) [1,2]. A utilização dessa tecnologia pode ser economicamente justificável, sobretudo quando a distância entre as estações for muito longa, visto que o investimento inicial para a instalação de um sistema HVDC completo (retificador + linha + inversor) torna-se menor em relação a um sistema CA convencional [1,2]. Entende-se por sistema de transmissão convencional aquele cujas linhas de transmissão possuem algumas centenas de quilômetros e apresentam dispositivos para compensação de reativos e por sistema não-convencional, aquele cujas linhas não apresentam uma silhueta convencional, ou seja, não seguem os padrões de torres atualmente utilizados. Um exemplo desse tipo de linha é a proposta por Portela *et al.* em [3,4]. Trata-se de uma linha sem compensação, cujo comprimento elétrico equivalente encontra-se na faixa ligeiramente superior ao meio comprimento de onda (distâncias da ordem de 2500 km).

De uma forma geral, os sistemas HVDC apresentam outras vantagens quando comparados a sistemas CA convencionais. Essas vantagens são listadas a seguir:

1. Interligação de sistemas assíncronos, utilizando características de ajustes de potência e/ou frequência não compatíveis com conexão síncrona, como é o caso da estação HVDC *back-to-back* de Garabi, que interliga os sistemas elétricos da Argentina ao Brasil [1].
2. Diminuição do efeito corona: os problemas relacionados ao efeito corona ocorrem tanto nos sistemas CA quanto nos sistemas CC [5]. Entretanto, as circunstâncias pelas quais ocorre o efeito são diferentes. Por exemplo, em dias secos, um sistema com tensão igual a 600 kV, apresenta as mesmas perdas tanto para sistemas CC quanto para CA. Em contrapartida, em dias úmidos, as perdas no sistema CC aumentam de forma bem menos significativa do que nos de CA.
3. Limitação da corrente de curto-circuito: quando uma rede CA é construída de uma usina até um centro de carga, o nível de corrente de curto-circuito aumenta no sistema receptor. Esta é a razão pela qual muitas unidades geradoras estão sendo conectadas através de elos CC.
4. Diminuição das perdas por efeito Joule, considerando mesma seção e mesmo nível de isolamento dos condutores.
5. Controle do intercâmbio de energia, garantindo que as margens de estabilidade do sistema sejam mantidas, impedindo a propagação de distúrbios graves, restringindo assim a extensão de blecautes.

No entanto, uma das maiores desvantagens dos sistemas HVDC quando comparados à transmissão CA deve-se à dificuldade em se extrair ou injetar pequenos blocos de energia em pontos intermediários da linha, fato este relacionado à sua característica de transmissão *ponto-a-ponto*. Vários trabalhos científicos foram desenvolvidos buscando soluções técnicas e economicamente viáveis para solucionar este problema [6-13]. Nestes trabalhos, fora proposto um equipamento, Tap HVDC, capaz de tornar os sistemas HVDC flexíveis quanto à extração de energia, assim como são os sistemas CA. Entretanto, até o momento, não há registros de estações Tap HVDC que permitam o intercâmbio de energia entre a linha de corrente contínua e possíveis consumidores e sistemas isolados.

Diante da perspectiva do aumento da oferta de energia elétrica para os próximos anos (Belo Monte e Madeira) e da distância desses empreendimentos até os grandes centros de carga, os sistemas HVDC constituiriam alternativas interessantes para a expansão da malha transmissora, quando o intercâmbio de pequenos blocos de energia entre as linhas de transmissão CC e os sistemas CA locais fosse realizável de forma econômica e confiável.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo apresentar uma nova configuração para o Tap HVDC, possibilitando o acesso de pequenos consumidores e geradores locais à linha HVDC, de modo a permitir o intercâmbio de energia elétrica entre os mesmos.

Inicialmente, será feita uma revisão sobre o Tap HVDC unidirecional e seu princípio de funcionamento. Em seguida, será apresentada a topologia bidirecional em energia para o equipamento, assim como seus controles. A fim de validar esta nova configuração do Tap HVDC, serão mostrados resultados de simulação no programa de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC.

## II. TAP HVDC UNIDIRECIONAL

A inserção do Tap HVDC ao sistema HVDC deve ser tal que não comprometa a operação normal do mesmo, ou seja, devem ser mantidos os mesmos níveis de segurança e de estabilidade [10-12]. Para isso, faz-se necessário um reduzido número de componentes ligados diretamente ao pólo e a operação destes tem de ser simples. O diagrama esquemático do Tap é apresentado na Figura 2.

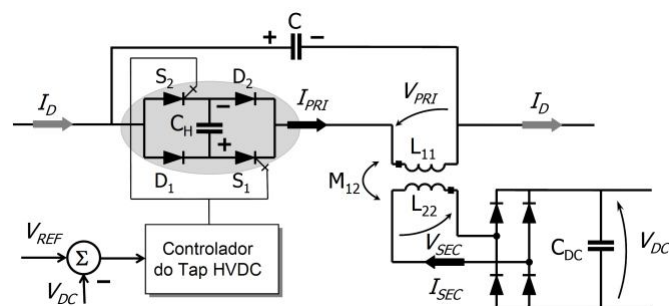


Fig. 2 Estrutura básica do Tap HVDC unidirecional.

Conforme pode ser observado, o Tap HVDC é constituído por uma chave controlada (Chave-H), composta por dois GTOs e dois diodos, conectada em série com o primário de um transformador com núcleo de ar. Em paralelo a esse conjunto, tem-se o capacitor principal (C), responsável pela circulação da corrente do HVDC nos intervalos em que a chave estiver aberta. Ao secundário do transformador é conectado um retificador não controlado, permitindo o carregamento do capacitor  $C_{DC}$ , utilizado como fonte de energia para os conversores CC-CA que alimentarão as cargas no lado CA. Maiores detalhes acerca do Tap HVDC unidirecional e de seus componentes poder ser encontrados em [10-12].

A corrente que circula no conversor é a própria corrente do HVDC. Quando a chave está aberta, a corrente  $I_D$  carrega o capacitor C. A chave então fecha-se e a tensão sobre o capacitor é aplicada aos terminais do transformador, descarregando o mesmo. Com este padrão de chaveamento, aparece uma tensão alternada nos terminais do transformador e o equipamento drena potência do sistema HVDC [10-12].

## III. TAP HVDC BIDIRECIONAL EM ENERGIA

De modo a se obter fluxo bidirecional de energia entre o elo CC do sistema HVDC e o sistema CA local são necessárias algumas mudanças nos circuitos de potência e de controle do equipamento [14]. A Chave-H, mostrada na Figura 2, é constituída por dois diodos e dois GTOs, estando ligada em série ao transformador com núcleo de ar [10-12]. Nesse novo modelo, a Ponte-H é composta por quatro GTOs

e por um capacitor  $C_H$ , tendo o primário do transformador em paralelo com este ( $L_{11}$ ), conforme sugerido em [8,9]. Este arranjo é tal como um conversor CSI (*Current Source Inverter*), onde a corrente de saída é mantida constante, independente da carga do inversor, enquanto que a tensão de saída é forçada a variar. O capacitor  $C_H$  funciona como um filtro para as componentes de frequência mais elevada introduzidas pela modulação PWM, além de prover um caminho de circulação em paralelo com a carga para a corrente CA [15]

Ao secundário do transformador tem-se um conversor monofásico-trifásico, responsável pelo atendimento das cargas CA e também pela conexão de geradores locais, caso existam. Este conversor é constituído por chaves autocomutadas, necessárias para garantir a característica bidirecional do mesmo [14]. A Figura 3 apresenta o diagrama esquemático do Tap HVDC em maiores detalhes.

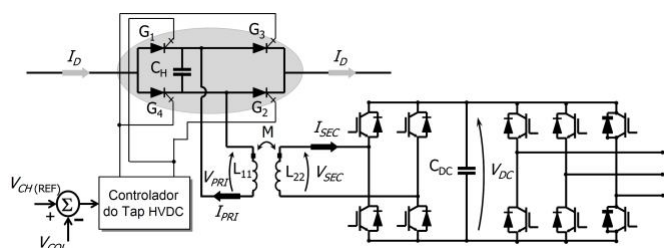


Fig. 3 Estrutura do Tap HVDC bidirecional em energia.

O princípio de funcionamento do equipamento pode ser explicado levando-se em consideração a defasagem existente entre a tensão no capacitor da Ponte-H e a corrente no secundário do transformador. Utiliza-se esta devido ao alto valor da corrente de magnetização do transformador com núcleo de ar, que influenciaria o controle. Quando  $V_{CH}$  estiver defasada de  $180^\circ$  de  $I_{SEC}$ , o equipamento estará injetando na linha HVDC o excedente de energia do lado CA. Quando  $V_{CH}$  e  $I_{SEC}$  estiverem em fase, o Tap estará drenando energia da linha HVDC de modo a suprir a demanda solicitada pela carga [14].

A configuração *back-to-back* do Tap permite que o mesmo opere conforme um SVC HVDC, bastando para isso interligar os conversores (monofásico e trifásico) por meio de cabos extrudados [16]. Dessa forma, pode-se criar um subsistema de transmissão em corrente contínua interligando consumidores isolados e possíveis fontes alternativas de energia (parques eólicos, entre outros).

#### A. Controle do Tap HVDC

O controlador do Tap HVDC tem a função de regular o dreno ou injeção de potência em limites pré-estabelecidos. A partir da tensão  $V_{CH}$  são criados dois sinais fictícios defasados em  $120^\circ$  elétricos e obtido o valor eficaz coletivo (no inglês, *collective rms value*) [17]:

$$V_{COL} = \sqrt{V_{CH}^2 + V_{CHB}^2 + V_{CHC}^2} \quad (1)$$

Compara-se então o valor eficaz de tensão com uma referência e o resultado é entregue a um controlador *proporcional-integral* (PI). O sinal obtido na saída desse PI multiplicado por uma referência senoidal é comparado com

uma portadora triangular gerando os pulsos de disparo para as chaves [14]. A Figura 4 apresenta o diagrama em blocos do controlador do Tap HVDC.

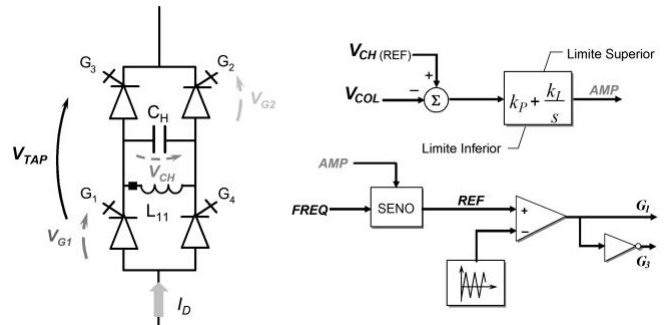


Fig. 4 Diagrama em blocos do controlador do Tap HVDC.

#### B. Controle do Conversor Monofásico

O controle do conversor monofásico é feito a partir da comparação entre a tensão  $V_{DC}$  com um valor de referência, onde o erro gerado é entregue a um controlador PI. Através de um circuito PLL (*Phase-Locked Loop*) é extraída a frequência e a fase da tensão  $V_{CH}$ , obtendo-se uma referência senoidal de mesma fase e frequência. A saída do controlador PI multiplicado por essa referência, corresponde à corrente que o conversor deverá sintetizar ( $I_{SEC(REF)}$ ). Compara-se a corrente medida com a de referência, aplicando-se o erro a um controlador, o qual será responsável pela implementação da estratégia de controle vetorial monofásico apresentada em [18]. O diagrama em blocos para o controle do conversor monofásico é mostrado na Figura 5.

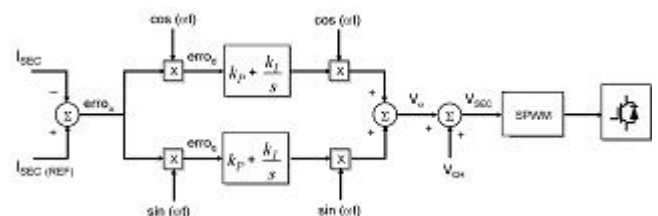


Fig. 5 Diagrama em blocos do controle do conversor monofásico.

#### C. Controle do Conversor Trifásico

O controle do conversor trifásico é feito de duas formas distintas. Quando o objetivo for injetar o excedente de energia do lado CA na linha HVDC, utiliza-se uma estratégia de controle por imposição de corrente baseada na *Teoria das Potências Ativa e Reativa Instantâneas - teoria pq* [19,20]. Quando o interesse for drenar energia do HVDC para o abastecimento das cargas no lado CA, tem-se um algoritmo de controle baseado em imposição de amplitude e fase. Embora com nomes distintos, as duas estratégias mencionadas se equivalem no objetivo de sintetizar tensões de referência. Estas tensões, obtidas com auxílio das estratégias já citadas, são aplicadas a uma técnica de controle vetorial, objetivando sintetizá-las nos conversores. Optou-se por utilizar as duas lógicas de controle apenas para comprovar que a *teoria pq* também pode ser aplicada ao caso em estudo, embora a técnica baseada em amplitude e fase

seja por si só, capaz de obter as tensões de referência e efetuar o chaveamento do conversor.

No controle por imposição de corrente utiliza-se a *Transformada de Clarke* para obtenção das tensões e correntes nas componentes  $\alpha\beta$ . As potências ativa e reativa da carga, em termos das variáveis neste novo sistema de coordenadas, são definidas por meio de:

$$\begin{bmatrix} p_{carga} \\ q_{carga} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Utiliza-se um filtro do tipo média móvel para a obtenção da parcela média da potência exigida pela carga ( $\overline{p'_{carga}}$ ). Compara-se a saída do filtro com um valor de referência, obtendo-se a potência a ser fornecida ou absorvida pelo conversor trifásico ( $\Delta p$ ).

De posse dos valores de  $\Delta p$  e das tensões da fonte nas coordenadas  $\alpha\beta$ , calcula-se as correntes de referência, conforme apresentadas em:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta p \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Conhecendo-se as correntes de referência nas coordenadas  $\alpha\beta$ , define-se a estratégia de disparo do conversor, aplicando-as a esta última (controle *dq*). A Figura 6 apresenta o diagrama em blocos para o controle acima descrito.

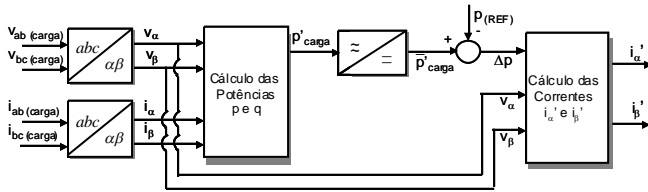


Fig. 6 Diagrama em blocos do controle utilizando *teoria pq*.

No controle por imposição de amplitude e fase são criados três sinais de referência senoidal de amplitude constante  $v_i$  ( $i = a, b, c$ ), devidamente defasados em  $120^\circ$  elétricos. A comparação destes sinais com uma portadora triangular, resultarão nos pulsos de disparo para o conversor PWM (*Pulse Width Modulation*).

#### D. Redimensionamento do Transformador

Caberá ao transformador do Tap HVDC a função de prover o isolamento galvânico necessário à proteção dos equipamentos conectados ao seu secundário e adequar os níveis de tensão e corrente em limites pré-estabelecidos.

Para se obter a potência desejada (50,0 MW), deve-se modelar um novo transformador com capacidade equivalente a dez transformadores idênticos ao utilizado inicialmente [10,11]. Para tal, utilizou-se a mesma linha de raciocínio adotada na otimização do Tap HVDC de 5,0 para 25,0 MW, cujos cálculos foram corroborados pelo professor Carlos Portela da COPPE/UFRJ [12]. Dessa forma, os enrolamentos do primário do transformador foram conectados em série, enquanto que os enrolamentos do secundário, em paralelo. Neste caso, entretanto, os níveis de tensão no transformador diferem dos valores inicialmente utilizados.

Considerou-se ainda que o transformador concebido esteja dimensionado para correntes maiores que a responsável pela potência ativa, sendo possível a utilização do mesmo frente às cargas com fator de potência igual a 0,8. Como o transformador é do tipo núcleo de ar, a frequência de operação do mesmo não é restrita à frequência da rede CA (60 Hz). Neste trabalho, adotou-se uma frequência de operação para o transformador igual a 180,0 Hz. A base de tensão no secundário do transformador será a mesma do sistema CA local, ou seja,  $V_{SEC} = 34,5$  kV.

As indutâncias nos enrolamentos primário e secundário ( $L_{11}$  e  $L_{22}$ , respectivamente) e a indutância mútua  $M_{12}$  do transformador são expressas por:

$$L_{11} = \frac{S_{base}}{S_{base (orig)}} \cdot L_{11 (orig)} = 30,0 \text{ mH} \quad (4)$$

$$L_{22} = \frac{S_{base (orig)}}{S_{base}} \cdot \left[ \frac{V_{SEC}}{V_{SEC (orig)}} \right]^2 \cdot L_{22 (orig)} = 14,28 \text{ mH} \quad (5)$$

$$M_{12} = k\sqrt{L_{11} \cdot L_{22}} = 15,5 \text{ mH} \quad (6)$$

Como a relação de espiras de um transformador é dada por  $Z_1 = a^2 \cdot Z_2$ , chega-se a:

$$a = \sqrt{\frac{L_{11}}{L_{22}}} = 1,45 \quad (7)$$

As bases de tensão e corrente no primário do transformador são expressas por:

$$V_{PRI} = a \cdot V_{SEC} = 50,0 \text{ kV} \quad (8)$$

$$I_{PRI} = \frac{S_{base}}{V_{PRI}} = 1,0 \text{ kA} \quad (9)$$

Com os valores de  $L_{11}$ ,  $V_{PRI}$  e  $I_{PRI}$  calcula-se a corrente de magnetização percentual do transformador, conforme apresentada em:

$$I_{mag \%} = \frac{100 \cdot V_{PRI}}{\omega \cdot L_{11} \cdot I_{PRI}} = 147,37 \% \quad (10)$$

A impedância base referida ao lado da Ponte-H é definida como:

$$Z_{base} = \frac{V_{PRI}^2}{S_{base}} = 50,0 \Omega \quad (11)$$

A reatância de dispersão em p.u. é dada por:

$$x_{disp (p.u.)} = \omega \cdot \frac{L_{11} + a^2 L_{22} - 2aM}{Z_{base}} = 0,34 \text{ p.u.} \quad (12)$$

A Tabela I sumariza as características do transformador com núcleo de ar redimensionado para 50,0 MW.

## IV. SISTEMA SIMULADO

O objetivo desta seção é apresentar o desenvolvimento e a simulação de um modelo digital do Tap HVDC no programa de transientes eletromagnéticos PSCAD/EMTDC.

Para tal, foi utilizado o sistema simplificado, apresentado na Figura 7, onde a linha CC foi modelada por uma fonte de corrente com magnitude igual a 2,61 kA, alimentando o lado CC do conversor série. O uso desta simplificação não compromete a investigação do desempenho do Tap, já que este mesmo controle foi inserido a um elo CC de um sistema HVDC completo – o *Cigrè HVDC Benchmark* – conforme mostrado em [14]. Esta permitiu ainda reduzir o esforço computacional necessário à simulação do caso em estudo.

**TABELA I**  
**Parâmetros do transformador com núcleo de ar**

| Características do Transformador                  | Valores  |
|---|----------|
| Potência Aparente ( $S_{base}$ )                  | 50,0 MVA |
| Indutância do enrolamento primário ( $L_{11}$ )   | 30,0 mH  |
| Indutância do enrolamento secundário ( $L_{22}$ ) | 14,28 mH |
| Indutância Mútua ( $M_{12}$ )                     | 15,5 mH  |
| Fator de Acoplamento ( $k$ )                      | 0,75     |

O circuito de potência do Tap HVDC é composto por um conversor CSI (*Current Source Inverter*), tendo em paralelo o primário do transformador. Ao secundário do mesmo conecta-se um conversor monofásico-trifásico, responsável pelo atendimento das cargas e, em paralelo com essas, um sistema CA é inserido ao sistema.

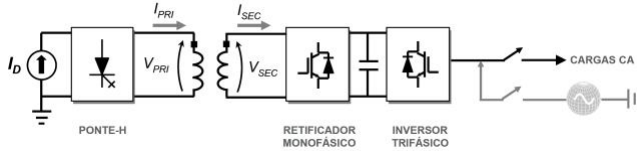


Fig. 7 Circuito utilizado na simulação.

Esse sistema CA possui tensão nominal de 34,5 kV com uma carga dimensionada para uma potência ativa de 50,0 MW e fator de potência igual a 0,8 indutivo. Para tal, utilizou-se uma impedância  $Z_L = (15,23 + j 11,43) \Omega$ . Essa carga absorve 5 % ou menos da potência nominal do elo CC, o que corresponde, aproximadamente, as perdas ôhmicas da linha de transmissão.

## V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A fim de comprovar a eficácia do equipamento quanto ao dreno e injeção de energia ao longo da linha HVDC, foi utilizado o sistema esquematizado na Figura 7.

O tempo total de simulação foi de 5 s. Os conversores monofásico e trifásico foram inicializados em  $t = 0,1$  s e 1 s, respectivamente. A geração local permaneceu conectada ao sistema no intervalo compreendido entre  $0 \leq \Delta t \leq 2,5$  s, enquanto que a carga RL foi inserida em 2,5 s e retirada em 4 s. No restante da simulação, não houve conexão de geradores ou de cargas ao sistema modelado.

A Figura 8 (a) apresenta as formas de ondas para as tensões sobre os GTOs 1 e 2 e sobre o capacitor da Ponte-H.

Analisando a Figura 4, percebe-se que a tensão sobre os terminais do Tap HVDC corresponde à composição das tensões sobre os GTOs 1 e 2 e sobre o capacitor  $C_H$ , conforme pode ser evidenciado na Figura 8 (b). Os elevados níveis de tensão envolvidos sugerem a necessidade de associação de GTOs em série, o que acarretaria dificuldades na equalização desta tensão. Uma alternativa seria inserir não somente GTOs, mas circuitos do tipo Ponte-H completos.

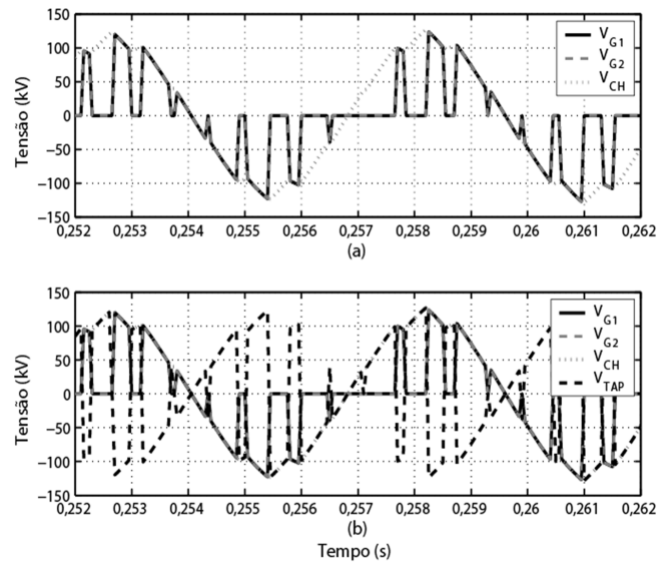


Fig. 8 (a) Tensões sobre os GTOs 1 e 2 e sobre o capacitor  $C_H$   
(b) Tensão sobre os terminais do equipamento,  $V_{TAP}$ .

Conforme visto na Seção III, a injeção ou o dreno de energia na linha HVDC está relacionado com a defasagem existente entre a tensão  $V_{CH}$  e a corrente  $I_{SEC}$ . Quando houver geração local e carga desconectada do sistema, o controle do equipamento atuará de forma a produzir uma defasagem de  $180^\circ$  entre  $V_{CH}$  e  $I_{SEC}$ , fazendo com que haja transferência de energia do lado CA para a linha HVDC. Em contrapartida, quando a carga estiver inserida ao sistema e a geração local desconectada do mesmo, a tensão  $V_{CH}$  e a corrente  $I_{SEC}$  estarão em fase, e o Tap drenará energia da linha CC para suprir a demanda solicitada pela carga. A tensão  $V_{CH}$  e a corrente  $I_{SEC}$  para o caso de injeção de energia no HVDC são mostradas na Figura 9 (a), Figura 9 (b) e Figura 9 (c). Na Figura 10 (a), na Figura 10 (b) e na Figura 10 (c) têm-se o perfil da tensão  $V_{CH}$  e da corrente  $I_{SEC}$  para a situação onde o equipamento drena energia do HVDC para suprir as cargas locais.

Na Figura 11 (a) é mostrada a tensão sobre o capacitor CC do inversor VSI (*Voltage Source Inverter*), enquanto que na Figura 11 (b) é mostrado o *ripple* sobre a mesma. No instante em que o conversor monofásico inicia sua operação, a tensão  $V_{DC}$  apresenta uma oscilação entre 0,98 e 1,04 p.u., o que equivale a, aproximadamente, 6 % em relação à tensão base. Em torno de 1,2 s, esta se encontra estabilizada com oscilações equivalentes a, aproximadamente, 0,26 % da tensão de referência. A frequência dessas oscilações é da ordem de 360,0 Hz, ou seja, duas vezes a frequência de operação do transformador.

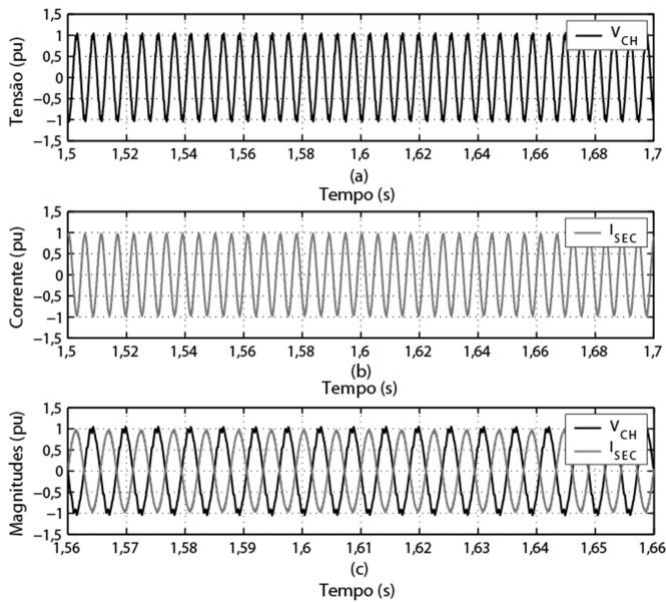


Fig. 9 (a) Tensão  $V_{CH}$  (b) Corrente  $I_{SEC}$   
(c) Tensão  $V_{CH}$  versus corrente  $I_{SEC}$  com o equipamento injetando energia na linha HVDC.

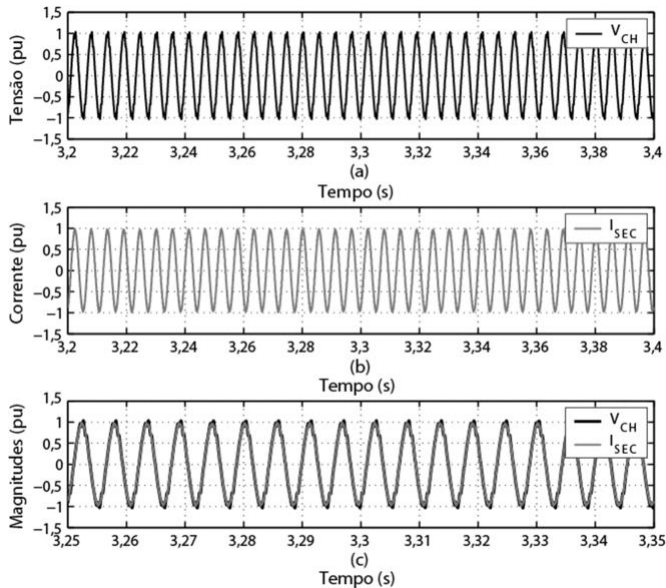


Fig. 10 (a) Tensão  $V_{CH}$  (b) Corrente  $I_{SEC}$   
(c) Tensão  $V_{CH}$  versus corrente  $I_{SEC}$  com o equipamento drenando energia na linha HVDC.

A Figura 12 (a) apresenta o valor instantâneo da tensão sobre os terminais do Tap HVDC, medida conforme mostrado na Figura 4. Já a Figura 12 (b), corresponde ao valor médio da mesma, obtido através de um filtro do tipo média móvel. Como a potência a ser drenada ou injetada na linha HVDC é da ordem de 50,0 MW, o valor médio da tensão  $V_{TAP}$  situa-se em torno de 19,0 kV, conforme pode ser evidenciado na Figura 12 (b).

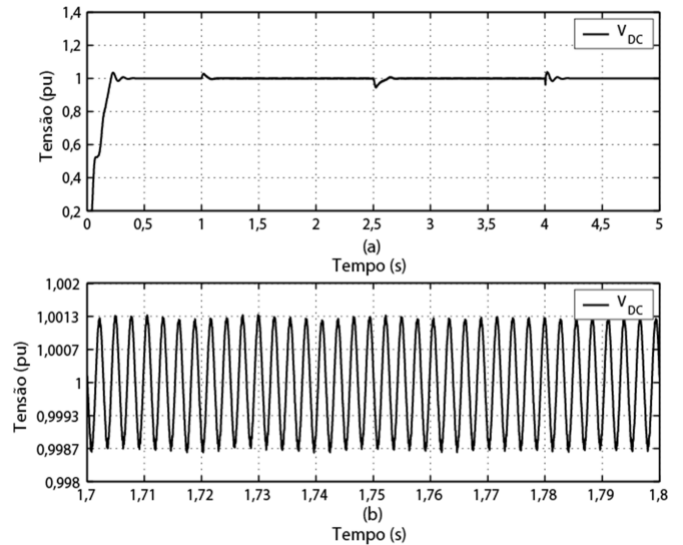


Fig. 11 (a) Tensão  $V_{DC}$  (b) *Ripple* sobre a tensão  $V_{DC}$ .

Na Figura 13 (a) é mostrada a potência ativa nos terminais do Tap HVDC, enquanto que a Figura 13 (b) apresenta a potência sobre os enrolamentos do transformador com núcleo de ar. No intervalo compreendido entre  $1,0 \text{ s} \leq \Delta t \leq 2,5 \text{ s}$ , observa-se que houve a injeção de energia do lado CA para a linha HVDC, enquanto que a partir de  $t = 2,5 \text{ s}$ , o controle do equipamento atuou de forma a drenar energia da linha HVDC, de maneira a atender a demanda solicitada pela carga. Em  $t = 4,0 \text{ s}$ , a carga e a geração local estão desconectadas do sistema, não havendo, portanto, intercâmbio de energia entre o lado CA e a linha HVDC.

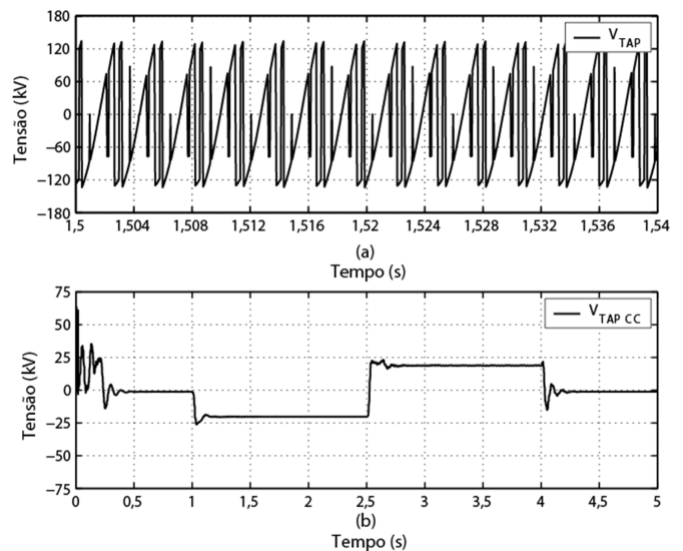


Fig. 12 (a) Valor instantâneo da tensão sobre os terminais do Tap HVDC (b) Valor médio da tensão  $V_{TAP}$ .

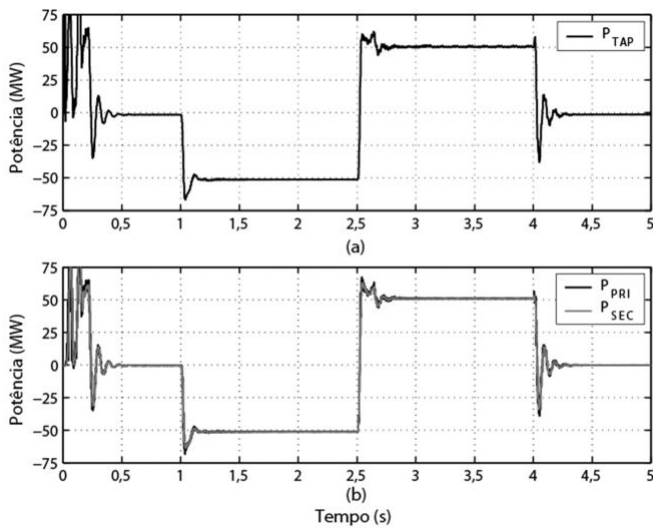


Fig. 13 (a) Potência ativa sobre os terminais do Tap HVDC (b) Potência ativa sobre os terminais do transformador com núcleo de ar.

A Figura 14 (a) mostra as correntes no primário e secundário do transformador quando o Tap HVDC está injetando energia no HVDC, enquanto que a Figura 14 (b) mostra essas mesmas correntes quando o Tap está drenando energia do HVDC para abastecer as cargas no lado CA. A elevação no valor da amplitude da corrente no primário do transformador deve-se ao valor da magnetização do mesmo, cerca de 1,47 p.u.

A energia reativa no primário do transformador está associada à corrente de magnetização do mesmo. A Fig. 15 apresenta a ordem de potência reativa em duas situações distintas: no primeiro caso – Figura 15 (a), para uma frequência de operação igual a 180,0 Hz e no segundo, caso – Figura 15 (b), para 400,0 Hz. Como a corrente de magnetização é inversamente proporcional à frequência de operação do mesmo, há uma diminuição dessa corrente e, conseqüentemente, da energia reativa no primário do transformador.

## VI. CONCLUSÕES

Muitos dos novos empreendimentos de geração de energia elétrica estão situados em localidades afastadas dos grandes centros consumidores, aumentando a relevância dos sistemas de transmissão. Sistemas HVDC permitem realizar conexões a longas distâncias, mas não permitem dreno e injeção de blocos de energia com a simplicidade de um transformador.

De modo a suprir esta limitação, este trabalho teve como objetivo a modelagem e a simulação digital de um novo modelo de Tap HVDC, permitindo a conexão tanto de consumidores quanto de geradores ao sistema principal, realizando intercâmbio de energia entre os mesmos.

Os resultados de simulação apresentados comprovam o correto funcionamento da estratégia de controle adotada, baseada na defasagem entre a tensão  $V_{CH}$  e a corrente  $I_{SEC}$ .

Os resultados também mostram que, nos períodos onde não ocorre dreno ou injeção de energia, a presença do

equipamento não influencia o desempenho do sistema. Este fato também fora comprovado quando da utilização de um sistema HVDC completo, conforme mostrado em [14]. Este é um fator importante, visto que tipicamente o Tap HVDC deve alimentar cargas e geradores de pequena potência, podendo estar conectados vários destes equipamentos, em pontos distintos ao longo da linha.

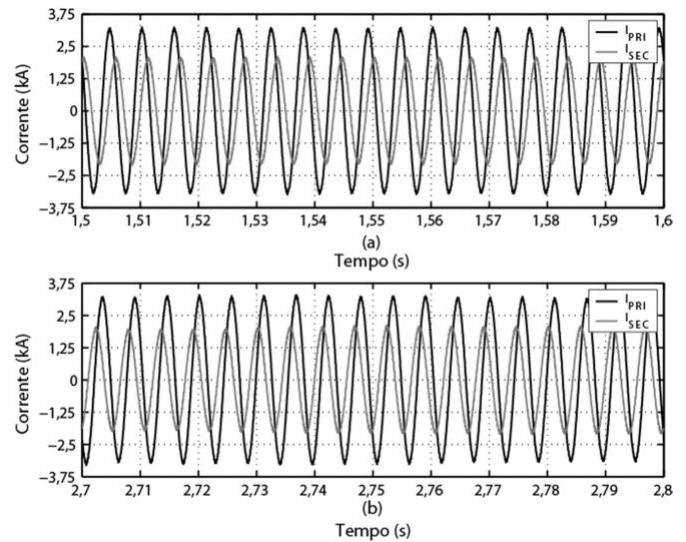


Fig. 14 (a) Correntes nos terminais do transformador quando o Tap HVDC está injetando energia no HVDC (b) Correntes nos terminais do transformador quando o Tap HVDC está drenando energia do HVDC.

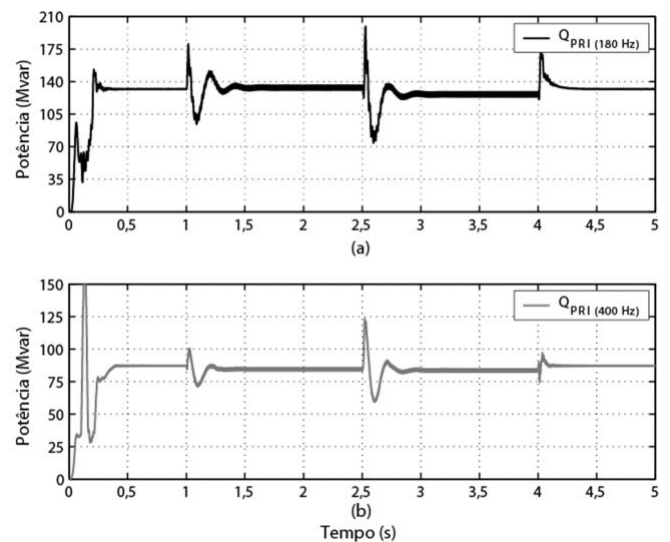


Fig. 15 (a) Potência reativa no primário do transformador com núcleo de ar quando este opera a 180,0 Hz (b) Potência reativa no primário do transformador com núcleo de ar quando este opera a 400,0 Hz.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V.K. Sood, HVDC and FACTS Controllers - Applications of Static Converters in Power Systems, *Kluwer Power Electronics and Power Systems Series*, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [2] E.W. Kimbark, Direct Current Transmission, Wiley-Interscience, New York, 1971.
- [3] C. Portela, M.C. Tavares, Modeling, Simulation and Optimization of Transmission Lines. Applicability and Limitations of Some Use Procedures, *IEEE PES-Society*, 38 pp., São Paulo – SP, Março de 2002.
- [4] C. Portela, S. Gomes Jr., Analysis and Optimization of Non-conventional Transmission Trunks, Considering New Technological Possibilities, *VI SEPOPE*, Salvador – BA, Maio de 1998.
- [5] A.M. de França, J.I.S. Filho *et al.*, Análise e Medição dos Efeitos devido ao Corona, ao Campos e aos Íons da Linha de Furnas em Corrente Contínua, *XIV SNPTEE*, Belém - PA, 1997.
- [6] J.P. Bowles, H.L. Nakra, A. B. Turner, A Small Series Tap on HVDC Line, *IEEE on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, n.º. 2, pp. 857-862, Feb. 1981.
- [7] M.P. Bahrman, M.H. Baker *et al.*, Integration of Small Taps into HVDC Links, *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 10, n.º. 3, pp. 1699-1706, July 1995.
- [8] M.R. Aghaebrahimi, R.W. Menzies, Application of Modern Power Electronics in Power Tapping from HVDC Transmission Systems, *Proceedings IEEE Wescanex*, pp. 306-311, 1995.
- [9] M.R. Aghaebrahimi, R.W. Menzies, Small Power Tapping from HVDC Transmission Systems: a Novel Approach, *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 12, n.º. 04, pp. 1698-1703, October 1997.
- [10] A.F.C. de Aquino, Alimentação de Pequenas Cargas a partir de Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua, *Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ*, Setembro de 2000.
- [11] M. Aredes, C. Portela, E.H. Watanabe, HVDC Tapping using Soft-Switching Techniques, *in Electrical Engineering, Archiv für Elektrotechnik*, vol. 83, pp. 33-40, February 2001.
- [12] M. Aredes, C. Portela, F.C. Machado, 25 MW Soft-Switching HVDC Tap for 500 kV Transmission Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1835-1842, October 2004.
- [13] L. Chetty, N.M. Ijumba, A.C. Britten, Parallel-Cascaded Tapping Station, *International Conference on Power System Technology -- POWERCON*, pp. 1874-1879, November 2004.
- [14] A.C. Borré, Bidirecionamento de Potência no Tap HVDC, *Dissertação de Mestrado (COPPE/UFRJ)*, Rio de Janeiro - RJ, Dezembro de 2003.
- [15] W. Komatsu, Conversores Auto-comutados Aplicados em Derivações de Sistemas de Transmissão de Corrente Contínua e Alta Tensão, *Tese de Doutorado, USP*, 1998.
- [16] L. Weimers, HVDC Light: A New Technology for a Better Environment, *IEEE Power Engineering Review*, August 1998.
- [17] M. Aredes, “Active Power Line Conditioners,” Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) Thesis, *Technische Universität Berlin*, March 1996.
- [18] U. Miranda, M. Aredes, L.G.B. Rolim, DQ Synchronous Reference Frame Control for Single-Phase Converters, *36<sup>th</sup> IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Recife - PE, June 2005.
- [19] 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.
- [20] 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.

## DADOS BIOGRÁFICOS

**Antonio Carlos Borré** nasceu em Petrópolis, Brasil. Recebeu os títulos de Engenheiro e Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 2003 e 2006, respectivamente. Atualmente, é aluno de doutorado do Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ. Suas áreas de interesse são modelagem e simulação de sistemas de potência com dispositivos FACTS e transmissão de energia em corrente contínua (sistemas HVDC).

**Edisio Alves de Aguiar Júnior** nasceu no Rio de Janeiro, em 1982. Recebeu o título de Engenheiro Eletrônico pelo CEFET-RJ, no ano de 2003. Em 2007, recebeu o título de M. Sc. em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Atualmente é aluno de doutorado do Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ. Suas áreas de interesse são aplicações de eletrônica de potência, fontes alternativas de energia e planejamento energético integrado.

**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, tomou-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.