



## GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

### REPRESENTAÇÃO DE TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA UTILIZANDO CONVERSORES FONTE DE TENSÃO EM ESTUDOS DE ESTABILIDADE ELETROMECÂNICA

**FABRICIO LUCAS LIRIO(1); LÍGIA ROLIM DA SILVA(1); NÍCOLAS ABREU ROCHA LEITE NETTO(1); RENAN PINTO FERNANDES(1)**  
**CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA CEPEL(1)**

#### RESUMO

Neste artigo é proposto um modelo matemático fasorial do sistema VSC–HVDC para estudos de estabilidade transitória, baseado na aplicação da teoria de fasores dinâmicos ao conjunto de equações diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico do conversor MMC. O modelo proposto neste trabalho apresenta também um sistema de controle vetorial de tensão CA, tensão CC e potência CC utilizando transformada d-q. O modelo VSC-HVDC será implementado no Programa Anatem por meio de fontes de tensão controladas por CDU – Controladores Definidos pelo Usuário.

#### PALAVRAS-CHAVE

Transmissão de Corrente Contínua, Transitório Eletromecânico, Anatem

#### 1.0 INTRODUÇÃO

Os conversores fontes de corrente, baseados em tiristores, são amplamente utilizados em sistemas de transmissão de corrente contínua (HVDC – “High Voltage Direct Current”). Estes conversores de comutação natural, também denominados conversores LCC – “Line Commutated Converter”, tem a capacidade de tensão e corrente necessários para aplicações em alta potência com bom desempenho e reduzidas perdas.

Os problemas relacionados à operação dos conversores LCC estão relacionados ao consumo de potência reativa, necessidade de potência de curto-circuito e possibilidade de ocorrência de falhas de comutação. Por outro lado, os conversores fonte de tensão VSC – “Voltage Source Converter”, baseados em chaves de comutação forçada como o IGBT – “Insulated Gate Bipolar Transistor”, apresentam um desempenho superior aos conversores LCC no que se refere à controlabilidade de potência reativa e à ausência de falhas de comutação.

As primeiras aplicações de conversores VSC utilizaram configurações de 2 ou 3 níveis e PWM – “Pulse Width Modulation”. Estas aplicações apresentam dificuldades de desempenho em altas potências, relacionadas principalmente ao conteúdo harmônico da tensão gerada na configuração de dois ou três níveis e às perdas devido ao chaveamento na configuração PWM.

O desenvolvimento da configuração MMC – “Modular Multilevel Converter” permitiu a aplicação dos conversores fonte de tensão em altas potências, uma vez que a associação de módulos e o uso da comutação na frequência natural permitiram a redução do conteúdo harmônico e das perdas por chaveamento, respectivamente.

Portanto, atualmente, é possível a construção de um sistema de transmissão em corrente contínua utilizando conversores fonte de tensão, principalmente aqueles que utilizam a tecnologia MMC, denominado na literatura técnica VSC-HVDC. Nas etapas de planejamento e operação destes sistemas de transmissão são necessários modelos matemáticos para realização de simulações e estudos elétricos.

Embora as aplicações de VSC-HVDC ainda não sejam uma realidade da operação do Sistema Elétrico Brasileiro, acredita-se que em breve esta tecnologia será avaliada e adotada. O VSC-HVDC permite aplicações em regiões com reduzida potência de curto-circuito, não exigindo suporte de potência reativa e podendo inclusive auxiliar no controle da tensão e estabilidade da rede CA. O fato desta tecnologia não apresentar o fenômeno de falha de comutação também possibilita o uso da transmissão de corrente contínua sem contribuir significativamente para o agravamento da interação entre conversores HVDC tradicionais em uma mesma rede CA, fenômeno denominado DC Multi-Infeed.

Neste artigo é proposto um modelo matemático fasorial do sistema VSC–HVDC para estudos de estabilidade transitória, baseado na aplicação da teoria de fasores dinâmicos ao conjunto de equações diferenciais que

descrevem o comportamento dinâmico do conversor MMC. O modelo proposto neste trabalho apresenta também um sistema de controle vetorial de tensão CA, tensão CC e potência CC utilizando transformada d-q. Por tratar-se de um modelo fasorial, aplicações de análise linear para ajuste de controladores também são possíveis, embora este não seja o objetivo do presente trabalho.

O modelo VSC-HVDC será estudado no Anatem [1], programa de transitórios eletromecânicos do CEPEL, por meio de fontes de tensão controladas por CDU – Controladores Definidos pelo Usuário. Os CDUs são capazes de representar as equações diferenciais dos fasores dinâmicos para os conversores emissor e receptor, a linha de transmissão CC e os sistemas de controle de tensão e potência.

Além da descrição do desenvolvimento do modelo VSC-HVDC, neste artigo também será apresentada a sua validação por meio de comparação com modelos desenvolvidos para programas de transitórios eletromagnéticos.

## 2.0 CONVERSOR MODULAR MULTINÍVEL

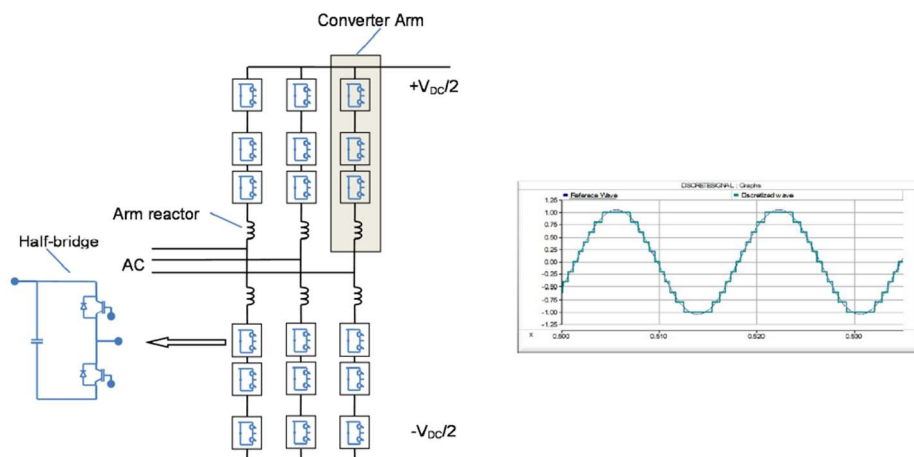
Inicialmente, as aplicações de transmissão em corrente contínua utilizando conversores fonte de tensão estavam restritas ao uso de cabos para o sistema de transmissão. Essa limitação deve-se principalmente a questão da dificuldade da eliminação da corrente de curto-circuito. No entanto, esta limitação está sendo contornada com o desenvolvimento de disjuntores de corrente contínua (DC breakers) e a adoção de topologias específicas de conversores. Portanto, o uso de conversores fonte de tensão com linhas aéreas é uma realidade, conforme verifica-se na Tabela I.

*Tabela I – VSC com Transmissão Aérea*

Projeto	Potência (MW)	Tensão (kV)	Comprimento em linha aérea (km)	Operação
Zambezi Link	300	350	952	2010
Maritime Link	500	200	187	2018
Pugalur-Trichure	2000	320	138	2021
Ultrahigh Voltage DC Grid	2000	380	340	em implantação
Zhangbei DC Grid	3000	500	227+66+126+219	2020
Kun Liu Long Multi-terminal híbrido	8000	800	932+557	2020

Nos últimos anos, o Conversor Modular Multinível tornou-se a tecnologia dominante para aplicações para transmissão em corrente contínua em alta tensão. Comparado com os conversores fonte de tensão convencionais de dois e três níveis, o MMC permite uma maior potência com reduzidas perdas de chaveamento e distorção harmônica.

O MMC é uma topologia de conversor fonte de tensão formada pela associação de submódulos formados por dois (*half-bridge*) ou quatro (*full bridge*) IGBTs e um capacitor, conforme exemplo apresentado na Figura 1. Modelos dinâmicos não lineares detalhados do MMC, com diferentes técnicas de modulação, são desenvolvidos em programas de transitórios eletromagnéticos como o PSCAD [2], no qual são incluídas as características detalhadas de todas as chaves. Estes modelos são de natureza discreta e necessitam de um grande esforço computacional para sua simulação, portanto a complexidade e o esforço de simulação aumentam à medida que o número de níveis aumenta [3].



Fonte: Manitoba-HVDC Research Centre

Figura 1: Topologia do Conversor Modular Multinível – MMC

Modelos fasoriais permitem a redução do esforço computacional de simulação ao representar a resposta média dos dispositivos chaveados, conversores e sistemas de controles por meio de equações matemáticas e fontes controladas de tensão ou corrente [4]. Particularmente, a teoria de fasores dinâmicos fornece um excelente suporte para construção destes modelos [5]. Os modelos fasoriais de MMC são bastante precisos e adequados para simulações de transitórios eletromecânicos, conforme será demonstrado neste artigo.

Os fasores dinâmicos são utilizados com sucesso em diversos trabalhos para obtenção de modelos fasoriais, tanto para simulação não linear no domínio do tempo como para análise linear à pequenas perturbações [6]. O conceito de fasor dinâmico baseia-se no fato de que uma função do tempo não periódica  $x(t)$  (descrita na Equação 1) pode ser aproximada por uma série de Fourier com coeficientes variáveis, onde os coeficientes  $X_k(t)$  são denominados fasores dinâmicos.

$$x(t) \approx \sum_k X_{kRe}(t) \cdot \cos k\omega t - X_{kIm}(t) \cdot \sin k\omega t \quad (1)$$

O modelo matemático do conversor MMC, ilustrado na Figura 2, para simulações de transitórios eletromecânicos foi obtido a partir da aplicação do conceito de fasores dinâmicos no equacionamento proposto em [4].

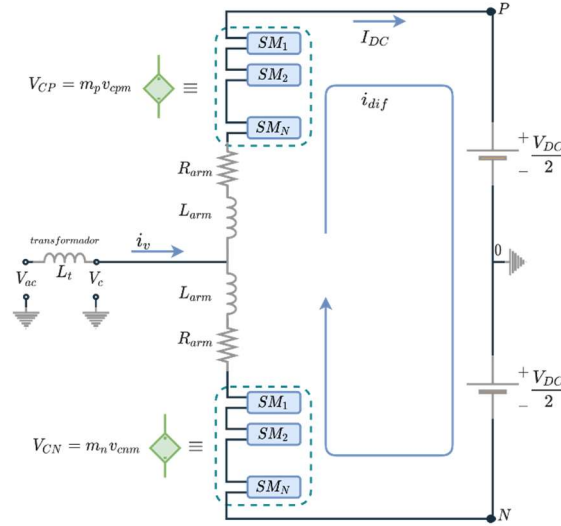


Figura 2: Braço do conversor MMC

Considerando apenas uma perna do conversor, a corrente circulante ou diferencial  $i_{diff}$  é descrita pela Equação (2).

$$\frac{\partial i_{diff}}{\partial t} = -\frac{R_{arm}}{L_{arm}} \cdot i_{diff} + \frac{m_p}{2L_{arm}} \cdot v_{cpm} + \frac{m_n}{2L_{arm}} \cdot v_{cnm} - \frac{v_{dc}}{2L_{arm}} \quad (2)$$

Sendo  $R_{arm}$  e  $L_{arm}$  são respectivamente a resistência e a indutância dos braços do conversor,  $m_p$  e  $m_n$  são os índices de modulação, respectivamente para os braços positivo e negativo do conversor,  $v_{cpm}$  e  $v_{cnm}$  são os somatórios das tensões nos capacitores dos braços positivo e negativo respectivamente e  $v_{dc}$  é a tensão do lado CC do conversor.

O somatório das tensões nos capacitores do braço positivo e negativo são dados respectivamente pelas equações (3) e (4):

$$\frac{\partial v_{cpm}}{\partial t} = -\frac{m_p}{C_{arm}} \cdot i_{diff} - \frac{m_p}{2C_{arm}} \cdot i_v \quad (3)$$

$$\frac{\partial v_{cnm}}{\partial t} = -\frac{m_n}{C_{arm}} \cdot i_{diff} + \frac{m_n}{2C_{arm}} \cdot i_v \quad (4)$$

Sendo,  $C_{arm} = C/N$ ,  $C$  é a capacitância de um submódulo,  $N$  é o número de submódulos por braço,  $i_v$  é a corrente do lado CA.

A tensão CA ( $E_{ac}$ ) do conversor é resultante das tensões nos braços do conversor:

$$E_{ac} = \frac{1}{2} (m_n \cdot v_{cnm} - m_p \cdot v_{cpm}) \quad (5)$$

O modelo fasorial é obtido pela substituição de todas as variáveis do circuito MMC pelo correspondente fasor dinâmico considerando apenas a frequência fundamental:

- Corrente diferencial:  $i_{dif} = I_{dif0}$
- Tensão CC:  $v_{dc} = V_{dc0}$
- Corrente CA:  $I_v = I_{v1Re} \cdot \cos(\omega t) - I_{v1Im} \cdot \sin(\omega t)$
- Somatório das tensões nos capacitores do braço positivo:  $v_{cpm} = V_{cpm0}$
- Somatório das tensões nos capacitores do braço negativo:  $v_{cnm} = V_{cnm0}$
- Índice de modulação do braço positivo:  $m_p = M_{p0} + M_{p1Re} \cdot \cos(\omega t) - M_{p1Im} \cdot \sin(\omega t)$
- Índice de modulação do braço negativo:  $m_n = M_{n0} + M_{n1Re} \cdot \cos(\omega t) - M_{n1Im} \cdot \sin(\omega t)$

### 3.0 SISTEMA DE CONTROLE

Os conversores fonte de tensão apresentam grande controlabilidade, sendo que, normalmente, nas aplicações de corrente contínua, são controladas as tensões CA nas duas extremidades, a potência e a tensão CC.

A maior parte das estratégias de controle são baseadas em controle vetorial, considerando os reguladores proporcional e integral para cálculo das correntes de referência de eixo direto e quadratura e as malhas de controle de corrente para cálculo das tensões de referência para a tensão gerada para o conversor.

No modelo apresentado neste trabalho, os conversores foram representados por fontes shunt de tensão controladas por CDU, sendo o sistema VSC-HVDC (ver Figura 3 e Figura 4) formado por três CDUs:

- CDU 1: modelo do conversor 1, responsável pelo controle da tensão CA, controle da potência CC e controle das correntes de eixo direto e quadratura;
- CDU 2: modelo do conversor 2, responsável pelo controle da tensão CA, controle da tensão CC e controle das correntes de eixo direto e quadratura;
- CDU 3: modelo  $\pi$  da linha de transmissão CC;

Conforme ilustra a Figura 3, as fontes de tensão controladas por CDU, que representam os conversores 1 e 2, tem o valor  $E_{ac}$  calculado pela equação da tensão CA utilizando os índices de modulação (dos braços positivo  $M_p$  e negativo  $M_n$ ) e o somatório das tensões nos capacitores (dos braços positivo  $v_{cpm}$  e negativo  $v_{cnm}$ ). O somatório das tensões nos capacitores é obtido da corrente CA pelo uso da equação da tensão dos capacitores dos braços  $I_v$ . Os índices de modulação são obtidos das tensões de eixo direto  $V_{D1}$  e quadratura  $V_{Q1}$  resultantes do sistema de controle vetorial. As tensões de eixo direto e quadratura são geradas pelo controle de corrente PI que utiliza as correntes de referência limitadas de eixo direto  $I_{DRFL}$  e quadratura  $I_{QRFL}$ . As correntes limitadas, por sua vez, foram obtidas das correntes de referência de eixo direto  $I_{DREF}$  e quadratura  $I_{QREF}$ .

A corrente diferencial  $I_{diff}$  calculada a partir da tensão CC  $V_{dc}$  e das tensões nos braços dos capacitores é enviada para o CDU do modelo da linha CC, este CDU recebe as correntes diferenciais de ambos os conversores e calcula as tensões CC.

Conforme ilustra a Figura 4, as correntes de referência do eixo direto e quadratura, são geradas pelos controles de potência CC e tensão CA do conversor 1, e pelo controle de tensão CC e tensão CA do conversor 2.

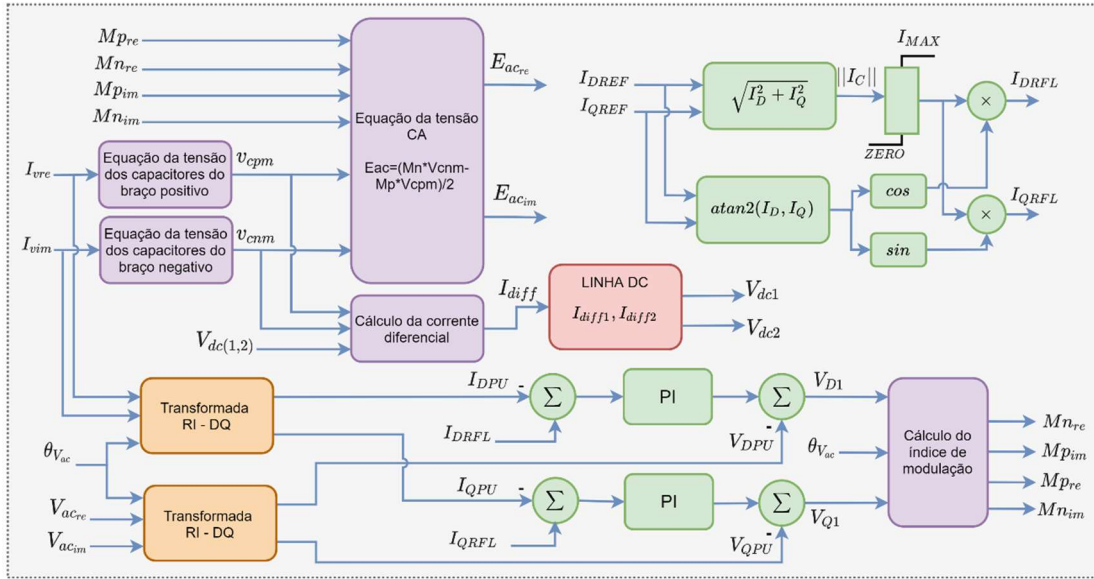


Figura 3: Diagrama do Controle do VSC-HVDC

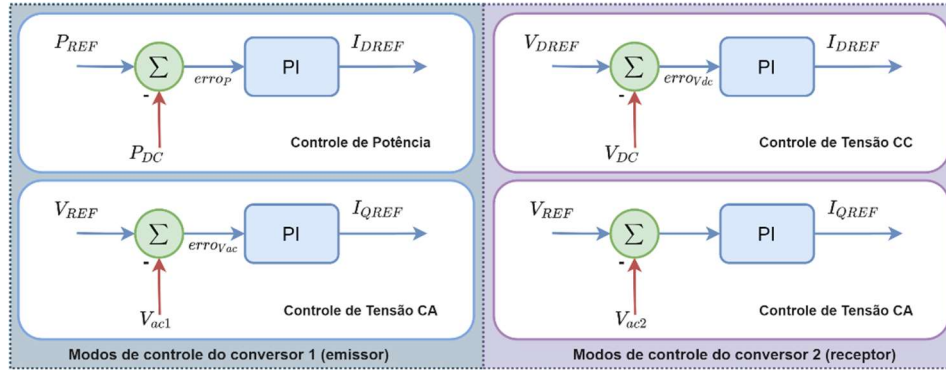


Figura 4: Modos de Controle dos Conversores 1 e 2

#### 4.0 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

A comprovação da eficiência do modelo proposto para simulações eletromecânicas foi realizada pela comparação dos resultados com o modelo detalhado, desenvolvido no PSCAD/EMTDC, para simulações eletromagnéticas. O modelo detalhado do PSCAD utiliza técnicas de modelagem para os submódulos do MMC proposta em [3] para redução do esforço computacional. Arquivos para simulação de transitórios eletromagnéticos envolvendo conversores VSC, como o que será utilizado para comprovação de resultados neste trabalho, podem ser obtidos gratuitamente na internet (<https://www.pscad.com/knowledge-base>).

Na avaliação dos resultados foi utilizado um sistema simples formado pelo sistema VSC-HVDC monopolar conectado a fontes de tensão por meio de uma impedância, conforme ilustrado na Figura 5. Em regime permanente o conversor 1 (emissor) e o conversor 2 (receptor) são representados por barras PV conectadas aos terminais 1 e 2 respectivamente conforme ilustrado na Figura 6. As redes CA de ambos os lados são iguais e formadas por uma resistência de 0,13% e impedância de 1,72% na tensão de 230 kV para uma base de potência de 100 MVA. As barras PV de ambos os conversores são ajustadas para uma tensão de 1 pu e despacho de 900 MW. Portanto, no caso de regime permanente as perdas de transmissão e nos conversores não estão consideradas. Logo a inicialização da simulação dinâmica não é parte do regime considerando perdas na linha CC, o que implica em um tempo de simulação de 5s até que o regime permanente considerando a linha CC seja atingido no Anatem. Vale destacar que o modelo detalhado no programa de transitórios eletromagnéticos também necessita de tempo semelhante para que o regime permanente seja alcançado.

Os transformadores conversores de 230/370 kV - 1200 MVA são representados no PSCAD pelo modelo de transformador de dois enrolamentos no qual foi retirado o efeito da saturação, enquanto no Anatem foi usado um transformador ideal em série com uma impedância de 28,34% na base 1000 MVA.

A linha CC é representada no modelo detalhado do PSCAD por um modelo de parâmetros distribuídos com dependência com a frequência e com 1000 km de comprimento, enquanto no modelo eletromecânico foi utilizado o recurso de CDU para representar um modelo  $\pi$  com parâmetros concentrados de  $R = 10,608$  ohms,  $X = 0,0176$  ohms,  $B = 0,0699$   $\mu\text{mho}$ .

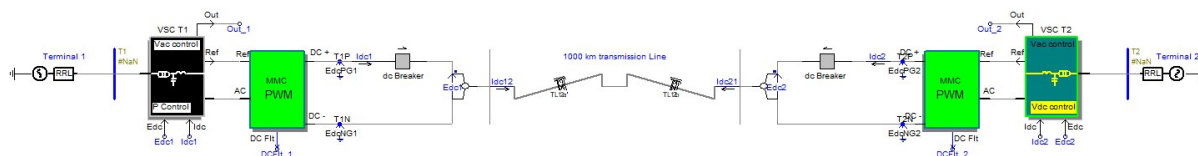


Figura 5: Sistema VSC-HVDC no PSCAD

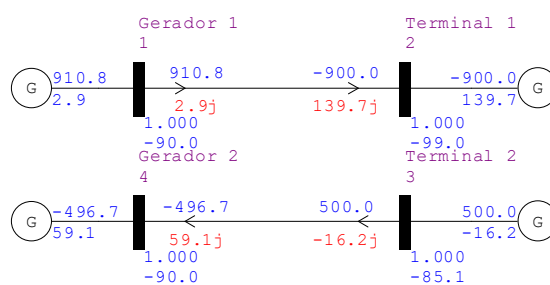


Figura 6: Sistema VSC-HVDC em Regime Permanente

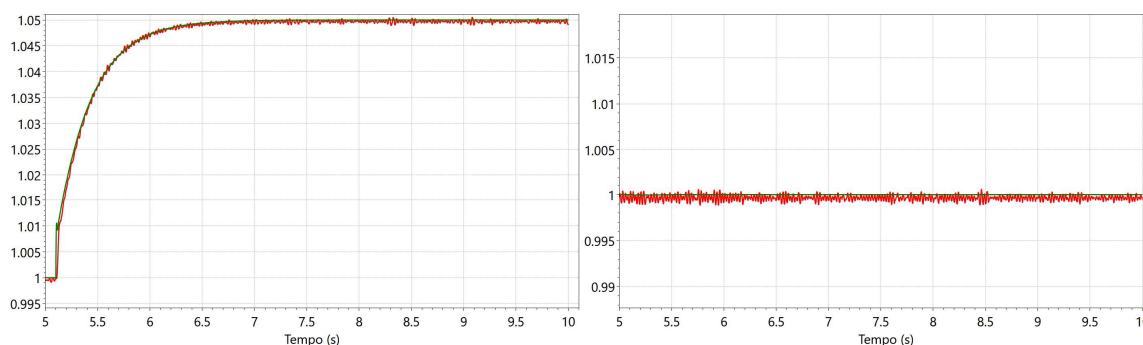
Conforme mencionando anteriormente, o conversor 1 realiza o controle da tensão CA do Terminal 1 e da potência CC transmitida, enquanto o conversor 2 controla a tensão CA do Terminal 2 e a tensão CC. Os ganhos dos controladores, tanto do Anatem quanto no PSCAD foram ajustados segundo a Tabela II.

Tabela II – Ganhos do Sistema de Controle

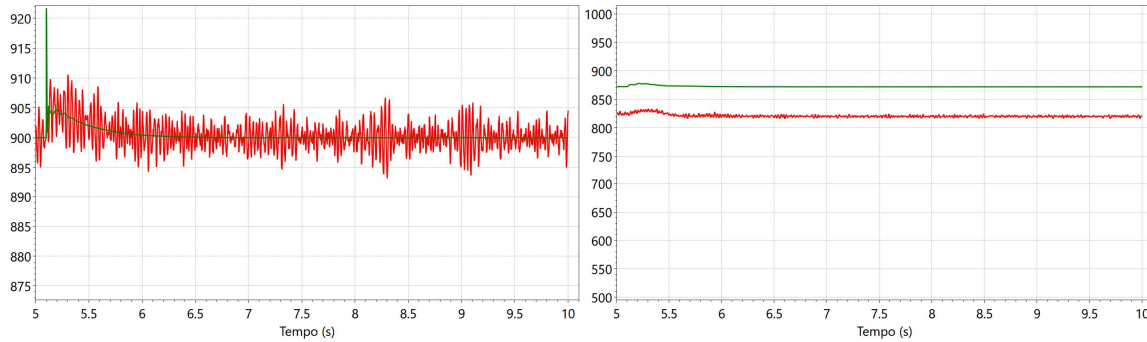
Malha de Controle	Parâmetro	Conversor 1	Conversor 2
Tensão CA	Kp	1	1
	Ki	20	20
Potência CC	Kp	1	-
	Ki	20	-
Tensão CC	Kp	-	1
	Ki	-	20
Corrente	Kp	0.07	0.07
	Ki	40	40

#### 4.1 Degrau na Tensão CA

Na aplicação de um degrau de 5% na referência do controle de tensão do conversor 1, observa-se a variação da tensão no conversor 1, sem variações significativas tanto na tensão no conversor 2, quanto na potência transmitida, conforme se verifica na Figura 7 e na Figura 8, respectivamente. A potência ativa no conversor 2 apresenta uma diferença em regime permanente resultante de perdas (ôhmicas e de chaveamento) no modelo detalhado do conversor que não são consideradas no Anatem. No entanto, o comportamento dinâmico do modelo Anatem (curva verde) é muito semelhante ao modelo detalhado (curva vermelha).



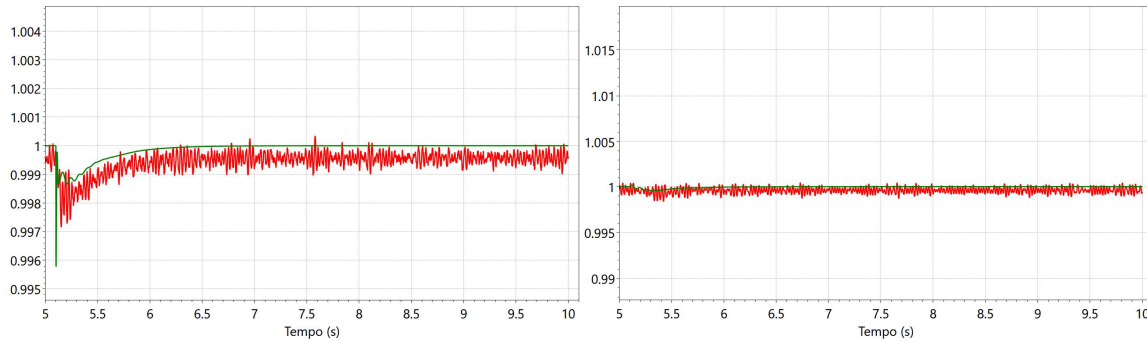
(a) (b)  
 Figura 7: Tensão terminal dos conversores 1 (a) e 2 (b) em pu



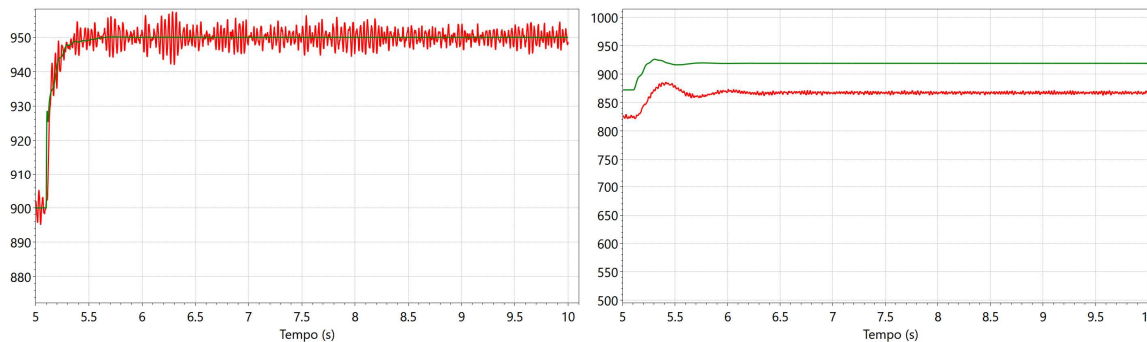
(a) (b)  
 Figura 8: Potência ativa dos conversores 1 (a) e 2 (b) em MW

#### 4.2 Degrau na Potência CC

Na aplicação de um degrau de 5% (50 MW) na referência do controle de potência CC, localizado no conversor 1, verifica-se que a potência ativa no sistema sofre uma variação de 50 MW, enquanto a tensão nos sistemas CA dos dois lados do conversor praticamente não é afetada conforme ilustram a Figura 9 e a Figura 10. Além da diferença de regime permanente, a potência ativa no conversor 2 é ligeiramente mais amortecida no Anatem (curva verde) do que no modelo detalhado (curva vermelha), mas é possível observar a semelhança dos resultados obtidos no Anatem quando comparados ao modelo detalhado.



(a) (b)  
 Figura 9: Tensão terminal dos conversores 1 (a) e 2 (b) em pu



(a) (b)  
 Figura 10: Potência ativa dos conversores 1 (a) e 2 (b) em MW

#### 4.3 Curto Trifásico



Nesta avaliação foi considerado um curto trifásico, por meio de uma impedância de 10 ohms, no terminal do conversor 1. Verificou-se apenas uma razoável semelhança entre os resultados do Anatem (curva verde) e do modelo detalhado no PSCAD (curva vermelha). Estas diferenças observadas na tensão do terminal 1 (Figura 10) e na dinâmica da potência ativa (Figura 11) em ambos os conversores provavelmente são resultantes das diferenças de representação da rede CA em programas eletromecânicos (admitância) e eletromagnéticos (equações diferenciais). Além da representação da rede CA, o modelo Anatem considera apenas a dinâmica de frequência fundamental, enquanto no modelo detalhado temos um modelo discreto de variáveis instantâneas onde os efeitos de todos os harmônicos são considerados.

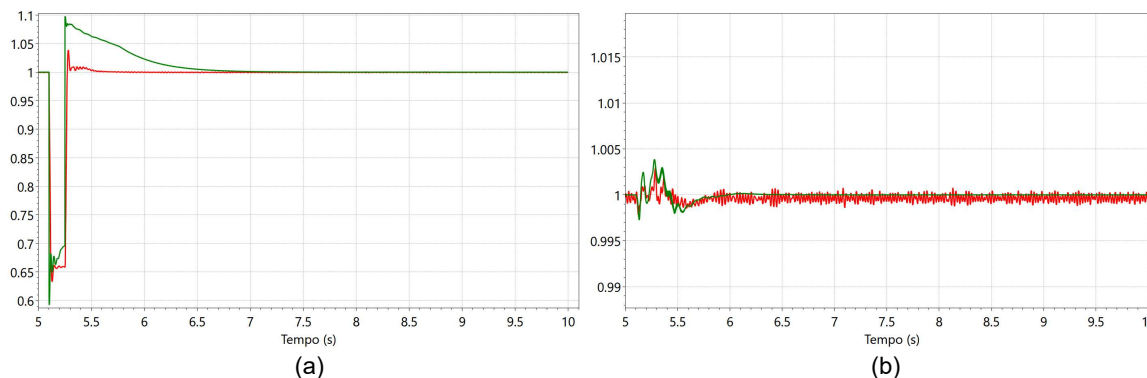


Figura 11: Tensão terminal dos conversores 1(a) e 2 (b) em pu

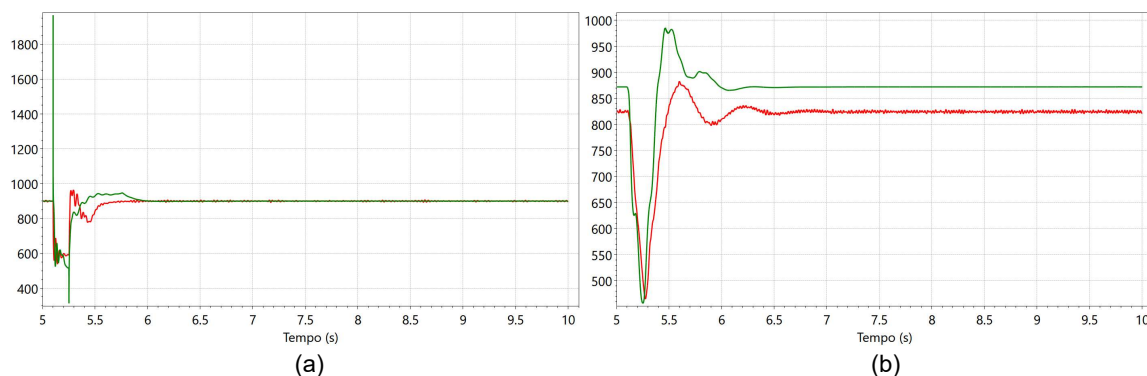


Figura 12: Potência ativa dos conversores 1 (a) e 2 (b) em MW

## 5.0 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um modelo de sistema VSC-HVDC, utilizando fasores dinâmicos, adequado para simulações de transitórios eletromecânicos. O modelo proposto considera apenas a dinâmica de frequência fundamental e pode ser desenvolvido com os recursos atuais do programa Anatem, particularmente, as fontes de tensão controladas por CDU.

A adoção de fasores dinâmicos permitiu a obtenção de equações diferenciais relacionando os fasores que podem, com relativa facilidade, ser representadas por blocos de CDU. Além do conversor, também foi considerado um controle vetorial com uma malha externa para controle de tensão e potência do sistema e uma malha interna para controle de corrente de eixo direto e quadratura.

A validação e avaliação da qualidade dos resultados apresentados foi realizada por meio de comparação com o programa de transitórios eletromagnéticos PSCAD. Considerando as características e simplificações presentes em programas de transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos, esta validação permite afirmar que o modelo fasorial proposto para o Anatem pode ser utilizado em estudos de estabilidade de transitórios eletromecânicos.

## 6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] LIRIO, F. L., NETTO, N. A. R. L. e DA SILVA, L. R. "Manual do Usuário do Programa Anatem", Cepel – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Fevereiro de 2021. Versão 12.0. Disponível em: <https://dre.cepel.br/manual/anatem/>.



[2] PSCAD – Manitoba-HVDC Research Centre.

[3] GNANARATHNA, U. N., GOLE, A. M. e JAYASINGHE, R. P. "Efficient Modeling of Modular Multilevel HVDC Converters (MMC) on Electromagnetic Transient Simulation Programs". IEEE Transaction on Power Delivery, vol 26, no1, pp 316-324, January 2011.

[4] JOVCIC, D., JAMSHIDIFAR, A. A. "Phasor Model of Modular Multilevel Converter With Circulating Current Suppression Control". IEEE Transaction on Power Delivery vol 30 no 4 August 2015.

[5] MATTARELLI P., VERGHESE, G. C., STANKOVIC, A. M. "Phasor Dynamics of Thyristor-Controlled Series Capacitor Systems". IEEE Transaction on Power System 1997.

[6] GOMES, S. Jr., MARTINS, N., STANKOVIC, A. M. "Improved Controller Design Using New Dynamic Phasor Models of SVC's Suitable for High Frequency Analysis". IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2005/2006.

## DADOS BIOGRÁFICOS



Fabricio Lucas Lirio possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), respectivamente em 1998 e 2000. Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) em 2007. Desde 2000 trabalha no Cepel, onde atua no Departamento de Redes Elétricas (DRE). Trabalha no desenvolvimento do Programa Anatem desde 2013, atual responsável pelo projeto Anatem, participou dos estudos da alternativa CCAT para o Aproveitamento das usinas do rio Madeira e Belo Monte. Seus campos de interesse são: Transmissão CCAT, Equipamentos FACTS, Controle aplicado a Sistemas de Potência, Estudos de Transitórios Eletromagnéticos, Eletromecânicos e Harmônicos.

### (2) LÍGIA ROLIM DA SILVA

Lígia Rolim da Silva possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual do Rio de Janeiro (2015) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2020). Desde 2015, trabalha no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, como pesquisadora do Departamento de Redes Elétricas, onde integra a equipe de desenvolvimento do programa Anatem. Atua na modelagem computacional de equipamentos de sistemas elétricos de potência para análise dinâmica de transitórios eletromecânicos. Suas áreas de interesse incluem dinâmica e controle de sistemas de potência, ressonância subsíncrona e transmissão CCAT. É membra do Comitê de Estudos C2 do Cigré-Brasil.

### (3) NÍCOLAS ABREU ROCHA LEITE NETTO

Formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2014) e M.Sc. em Engenharia Elétrica (2016) pela mesma instituição. Desde 2014, trabalha como pesquisador no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), onde tem atuado na área de métodos computacionais para dinâmica de sistemas de potência e análise de segurança de sistemas de potência, pertencendo à equipe de desenvolvimento do software Anatem. Suas áreas de atuação incluem computação de alto desempenho, dinâmica e confiabilidade de sistemas de potência.

### (4) RENAN PINTO FERNANDES

Renan Pinto Fernandes é pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) desde 2014, onde trabalha como parte da equipe de desenvolvimento do programa Anarede. Possui graduação (2012) e mestrado (2014) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Tem experiência nas áreas de análise de sistemas de potência, em regime permanente e dinâmico, e em planejamento da expansão e da operação. Foi Presidente do Capítulo PES do IEEE entre 2016 e 2019.