XVIII ERIAC
DÉCIMO OITAVO ENCONTRO
REGIONAL IBERO-AMERICANO DO CIGRE

Foz do Iguaçu, Brasil

19 a 23 de maio de 2019

CE-NN

Comitê de Estudos B4 – HVDC e Eletrônica de Potência

UTILIZAÇÃO DE UMA PLATAFORMA SUL-AMERICANA DE SIMULAÇÃO PARA ESTUDOS ENVOLVENDO SISTEMAS DE TRANSMISSÃO CA E CC

G. S. Salge*
Conprove Indústria
Brasil

P. S. P. Junior
Conprove Indústria
Brasil

M. J. B. B. Davi
Conprove Indústria
Brasil

C. M. Martins
Conprove Indústria
Brasil

P. S. Pereira
Conprove Engenharia
Brasil

G. E. Lourenço
Conprove Engenharia
Brasil

Resumo *– Este artigo tem como objetivo demonstrar a utilização de uma plataforma computacional amigável para realização de estudos envolvendo sistemas de transmissão CA, CC e equipamentos FACTS. Serão feitos estudos de caso abordando a utilização de compensadores estáticos (SVC) como reguladores de tensão, operação de linhas série compensadas (TCSC) e sistemas HVDC (CIGRÉ Benchmark). Com isso, serão realizadas discussões sobre: a eficácia do compensador estático atuando como regulador de tensão, a efetividade dos compensadores série no aprimoramento dos níveis de transferência de potência de um sistema e o comportamento dos controles confeccionados para sistemas HVDC.*

Palavras-chave: FACTS – Eletrônica de Potência – Compensadores – SVC – TCSC – HVDC – Simulação – Transitórios Eletromagnéticos.

1 INTRODUÇÃO

Devido à complexidade dos sistemas elétricos de potência, é fundamental a compreensão dos fenômenos transitórios aos quais os equipamentos podem ser submetidos visando elevar sua vida útil. Embora esses sistemas operem em regime permanente durante grande parte do tempo, os mesmos devem ser projetados para suportar solicitações extremas de tensão e corrente que ocorrem durante o regime transitório.

Os estudos de transitórios eletromagnéticos demandam um nível de detalhamento rigoroso justificado pelo fato destes transitórios serem responsáveis por grande parte das falhas no suprimento de energia e rupturas nos isolamentos de equipamentos. Diante disso, é de suma importância a realização destes estudos com a utilização de ferramentas especializadas que permitam a reprodução dos fenômenos transitórios, a identificação de defeitos e o diagnóstico de falhas.

Neste contexto, o artigo terá como foco a apresentação de uma plataforma computacional e sua utilização para realização de estudos envolvendo sistemas de transmissão CA, CC e equipamentos FACTS. A proposta da ferramenta é possibilitar a modelagem e análise de sistemas elétricos complexos, dispondo de uma interface amigável ao usuário e recursos avançados para simulação de transitórios eletromagnéticos, eletromecânicos e sistemas de controle.

2 DESENVOLVIMENTO

O programa PS SIMUL, desenvolvido no Brasil desde o ano de 2009 pela empresa CONPROVE, teve sua primeira versão lançada em 2014 e possui uma versão gratuita disponibilizada pelo site da empresa [1]. Este software, criado com a finalidade principal de permitir ao usuário modelar os mais variados e complexos componentes dos sistemas de potência/controle e simular transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos, possui uma interface bastante intuitiva e amigável, utilizando uma série de recursos que facilitam a entrada de dados em geral, assim como a obtenção e avaliação de resultados. A Figura 1 apresenta a tela principal do programa.

* Rua Visconde de Ouro Preto, nº 75, CEP 38.405-202, Uberlândia, MG, Brasil – conprove@conprove.com.br

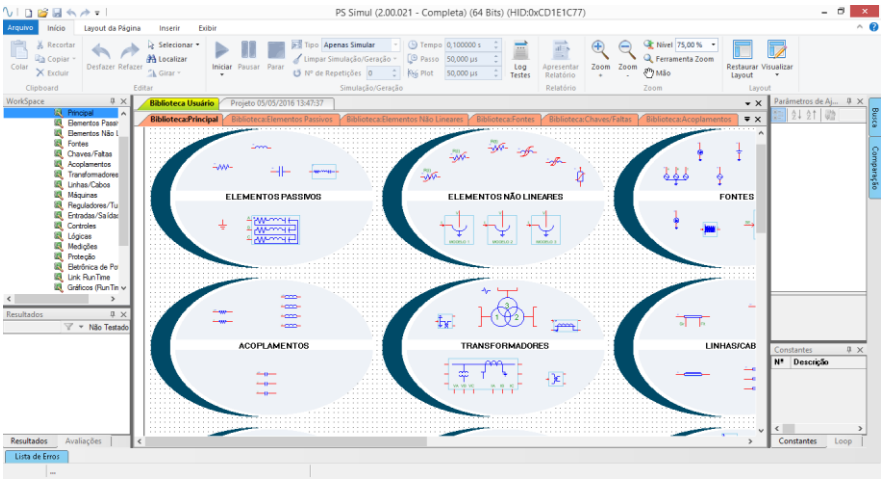

Fig. 1. Tela principal do programa PS SIMUL.

A metodologia de trabalho do software o subdivide em dois ambientes: Draft e Runtime. No ambiente do Draft o usuário realizará a modelagem do sistema a ser simulado adicionando componentes de potência e/ou controle, disponibilizados pela biblioteca do aplicativo, e direcionando os sinais que deseja visualizar graficamente após a simulação. Já no ambiente da Runtime, o usuário irá visualizar os resultados obtidos através da inserção de gráficos dos tipos: analógicos, digitais, fasores, trajetórias de impedância, gráfico de barras, gráficos XY, entre outros. A montagem de painéis para controle de variáveis do sistema modelado também é possibilitada na Runtime pelos blocos: Dial, Chave, Slider, LED, Medidor, e etc. A Figura 2 ilustra os ambientes supracitados.

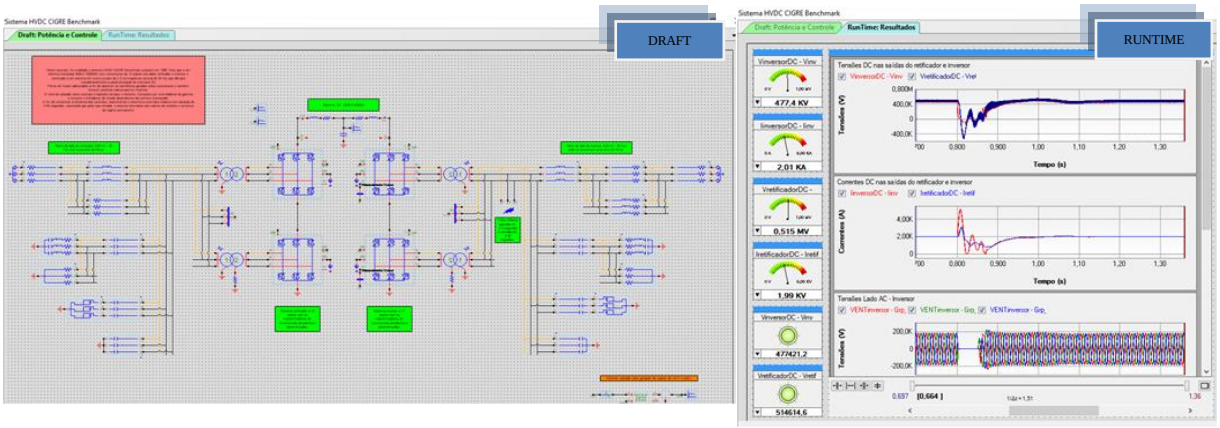

Fig. 2. Ambientes de Draft e Runtime do software PS Simul.

Em se tratando dos recursos disponibilizados, seguem algumas das principais características deste software:

- Utiliza o método híbrido de solução das equações diferenciais (Trapezoidal + Interpolação + Euler) que evita a ocorrência de oscilações numéricas durante a simulação;
- Possibilidade de reprodução de distúrbios reais no software com a importação de arquivos no formato COMTRADE ou CSV;
- Geração automática de relatórios completos das simulações;
- Definição, pelo usuário, de rotinas automatizadas de testes com a definição de parâmetros como constantes e a posterior realização de avaliações automáticas dos resultados obtidos, por amplitude ou tempo;
- Possibilita a conexão direta com as malas de testes da CONPROVE para a geração das formas de onda obtidas na simulação sem a necessidade de exportação para formato COMTRADE;
- Método Iterativo que, juntamente com a mala de testes, permite a realização de testes em malha fechada com a realimentação de sinais binários;
- Disponível nos idiomas Português, Inglês e Espanhol.

Outro grande diferencial dessa ferramenta está na quantidade e nível de detalhamento dos componentes disponibilizados em sua biblioteca que atualmente conta com mais de 400 blocos divididos pelos grupos: Elementos Passivos, Elementos Não Lineares, Fontes, Chaves/Faltas, Acoplamentos, Transformadores, Linhas/Cabos, Máquinas, Reguladores e Turbinas, Entradas/Saídas (conexão com hardware externo), Controles, Lógicas, Medição, Proteção, Eletrônica de Potência, Link com Runtime, Runtime e Outros.
Tendo em vista que o foco para demonstração desta ferramenta no artigo relaciona-se à utilização de modelos e recursos para simulação de sistemas de transmissão CA e CC, serão destacados os seguintes componentes:

- **Modelos de fontes e cargas:**
  A fim de representar as fontes e cargas de um sistema elétrico, são disponibilizados: componentes RLC monofásicos e trifásicos nas mais diversas configurações (série, paralelo, estrela, delta, etc.), fontes trifásicas e monofásicas ideais e reais com definições de impedância pelos níveis de curto-circuito ou pelos valores de sequência, máquinas síncronas, assíncronas, DC, entre outras. Existe ainda a possibilidade de simulação de cargas não lineares tais como indutores saturáveis, para-raios e fornos a arco.
- **Modelos para simulação de linhas de transmissão:**
  A ferramenta possibilita ao usuário a simulação de linhas nos modelos PI, RL, Sem Perdas, Bergeron e modelos dependentes da frequência no domínio modal ou das fases. A entrada de dados pode ser feita pela geometria, matrizes RLC ou matrizes de sequência, podendo ou não ser habilitado o recurso de falta que torna possível ao usuário a aplicação de faltas a qualquer distância da linha (km ou %) sem a necessidade de realizar divisões manuais da mesma.
- **Modelos de transformadores de potência:**
  O software também disponibiliza modelos reais e ideais de transformadores de 2 a 5 enrolamentos, com a possibilidade de acesso aos enrolamentos para aplicação de curto entre espiras ou entre espiras e terra, por exemplo. Além disso, a entrada de dados dos transformadores pode ser realizada pelos dados de circuito equivalente ou dados de ensaios.
- **Modelos de componentes de eletrônica de potência:**
  Além dos componentes básicos da eletrônica de potência (Diodo, IGBT, Mosfet, Tiristor, TRIAC, etc.), estão disponíveis também modelos como: pontes retificadoras/inversoras monofásicas ou trifásicas, compensadores série controlados por tiristores (TCSC) monofásicos e trifásicos, reatores controlados por tiristores (TCR), capacitores chaveados por tiristores (TSC), compensadores estáticos de reativo (SVC), controles para geração de pulsos, entre outros.

3 ESTUDOS DE CASO

3.1 Utilização de um compensador estático (SVC) para controle de tensão em um sistema de 735 kV:

O compensador shunt utilizado neste estudo (SVC) é composto por uma associação de reatores controlados por tiristores e bancos de capacitores chaveados com a função de, pela injeção de potência reativa, controlar o nível de tensão e/ou compensar o fator de potência da carga. A presença de reatores e capacitores permite a compensação reativa nos dois sentidos (indutivo e capacitivo) [2].
O estudo demonstrará a utilização de um compensador estático de reativo (+280 MVAr/ -100 MVAr) como regulador de tensão em um sistema de potência (5000 MVA / 735 kV). O compensador neste caso, consiste de um transformador de acoplamento de 400 MVA, um banco de reatores controlado por tiristores (100 MVAr) e quatro estágios de bancos capacitivos controlados por tiristores (280 MVAr dividido em quatro estágios iguais).
O controle monitora a tensão no primário do transformador de acoplamento para ajustar o ângulo de ativação ideal aos tiristores dos bancos de reatores e capacitores, visando manter no barramento a tensão de referência parametrizada. Segue representado na Figura 3 o sistema modelado no software PS Simul.

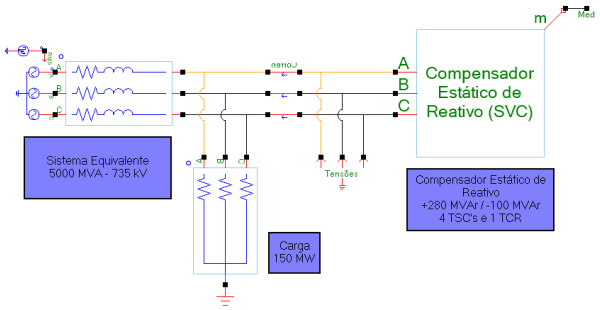

Fig. 3. Sistema modelado no programa PS Simul para análise do compensador estático (SVC).

Conforme mostra a Figura 3, a biblioteca do software PS Simul já disponibiliza um modelo de compensador estático, composto basicamente por um transformador de acoplamento conectado a bancos capacitivos (TSC) e indutivos (TCR) controlados por tiristores. O componente permite que o usuário modele um sistema de controle e geração de pulsos externamente e também contempla um controle interno automático que opera como regulador de tensão ou de potência reativa, a fim de gerar os ângulos de disparo (para todos os tiristores do TCR) e sinais de habilitação para os estágios capacitivos. Caso o usuário opte por confeccionar todo o arranjo do compensador sem utilização do componente pronto, o circuito equivalente proposto por este modelo segue na Figura 4.

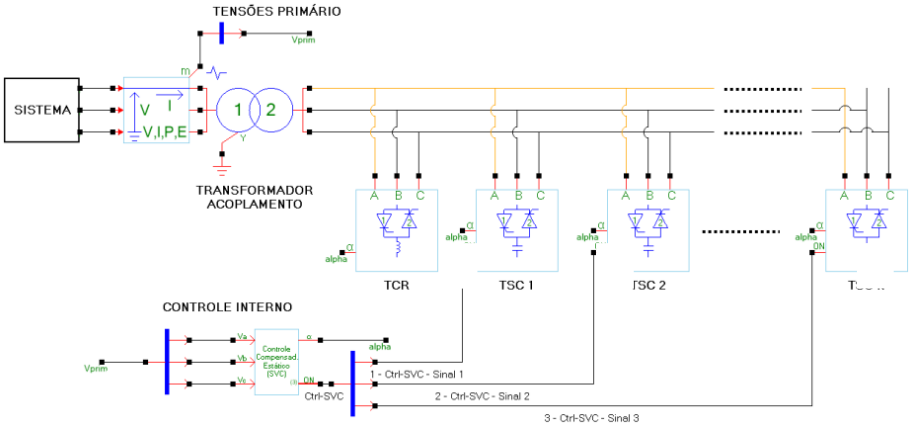

Fig. 4. Circuito equivalente do modelo de compensador estático proposto.

Objetivando demonstrar a atuação do compensador como regulador de tensão (tensão de referência de 1 pu) foram impostas condições de sub e sobretensões na fonte do sistema equivalente. Foram simulados três eventos: uma sobretensão para 1,03 pu no instante t = 0,1 segundo; uma subtensão para 0,95 pu no instante t = 0,6 segundo e, por fim, o retorno para a tensão nominal no instante t = 1,1 segundo. A Figura 5 apresenta as formas de onda de: número de bancos capacitivos ativos (a), tensão em pu medida no primário do transformador de acoplamento comparada com a tensão de referência parametrizada (b), potência reativa fornecida pelo compensador (c) e ângulo de ativação calculado pelo controlador (d).

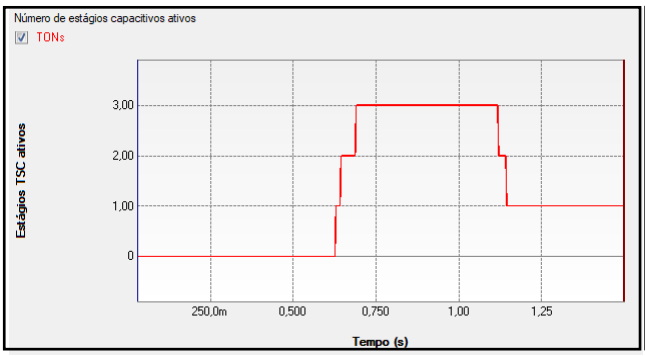

Fig. 5-(a). Estágios capacitivos ativos

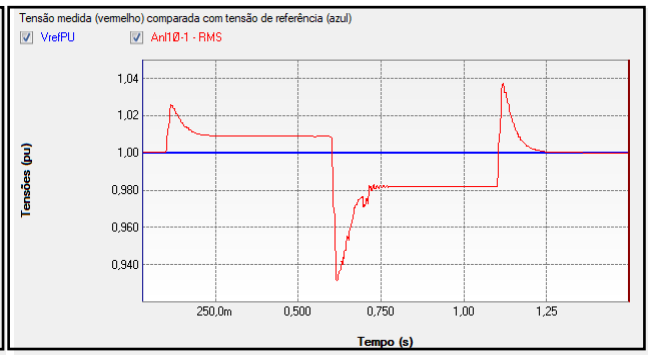

Fig. 5-(b). Tensão medida x Tensão referência

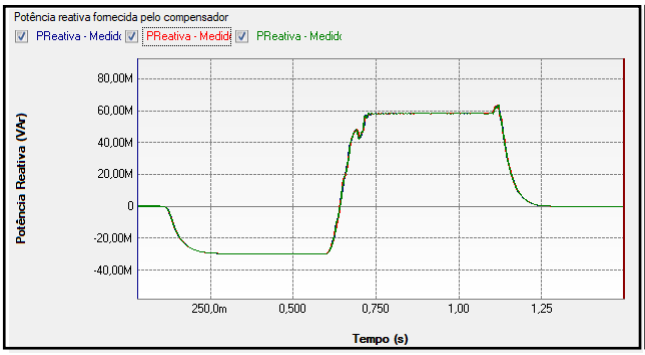

Fig. 5-(c). Potência reativa monofásica fornecida.

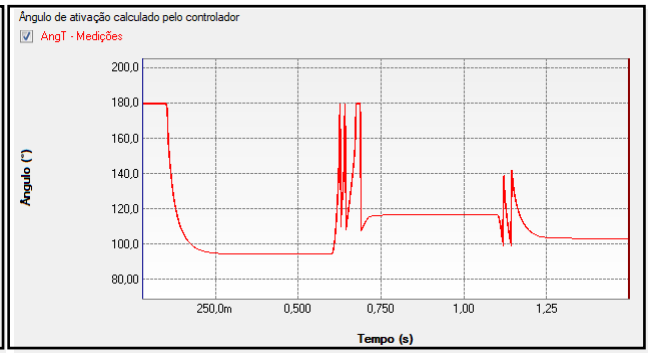

Fig. 5-(d). Ângulo de ativação calculado.

Percebe-se pelas formas de onda que até o instante t = 0,1 segundo, a tensão na barra de conexão do compensador é de 1 pu, portanto não há bancos de capacitores ativos e o ângulo de ativação utilizado para geração de pulsos aos tiristores do TCR é de 180° (sem condução). Ao ocorrer o evento de sobretensão para 1,03 pu no instante t = 0,1 segundo, o controle atua no ângulo de ativação dos tiristores do TCR que atinge o valor de 94,5°, fazendo com que o compensador absorva uma potência reativa total de 89,7 MVAr. Dessa forma a tensão é controlada em 1,01 pu. Esta tensão se mantém até o instante t = 0,6 segundo, quando ocorre o evento de subtensão para 0,95 pu. Com isso, há novamente a atuação do controle ativando três estágios capacitivos e reduzindo a absorção de reativo do TCR para aproximadamente 45% de seu valor nominal (116,7°). Isso resulta no fornecimento de 175 MVAr de reativo pelo compensador para o sistema, proporcionando o controle da tensão em 0,982 pu. Por fim, com o retorno da tensão da fonte do sistema equivalente para o valor nominal em t = 1,1 segundo, verifica-se que o reativo fornecido pelo compensador se anula, conforme esperado para tal condição.

Visto que todos os resultados obtidos foram satisfatórios, pode-se então concluir que o software PS Simul se mostrou bastante eficaz na realização de estudos envolvendo compensadores estáticos, sendo importante ressaltar o enorme ganho de tempo experimentado para realização de tais testes já que a biblioteca do software contempla diversos elementos prontos e dispensa, na grande maioria das vezes, a necessidade de confecção de novos modelos pelo usuário.

3.2 Compensação série (TCSC) de uma linha de transmissão de 500 kV:

O compensador série foco de análise neste estudo (TCSC) é composto por reatores controlados por tiristores, associados em paralelo com capacitores, cuja função é variar a reatância da linha e controlar o fluxo de potência transmitida. Tal configuração visa permitir a compensação nos dois sentidos (aumentar ou diminuir a reatância total) [3,4].

No estudo em questão, um TCSC foi utilizado para prover a compensação de uma linha longa (nesta ocasião representada pelo modelo RL, com R = 6 Ω e X_L = 162,1 Ω) cujo nível de tensão é de 500 kV, visando um aprimoramento nos níveis de transferência de potência do sistema modelado. A Figura 6 ilustra o sistema modelado no software PS Simul e os dados do sistema.

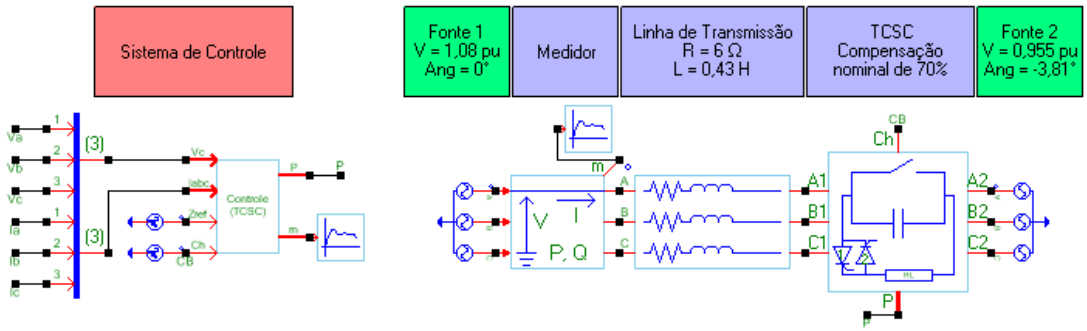

Fig. 6. Sistema modelado no programa PS Simul para análise do compensador série (TCSC).

O comportamento do compensador série é ditado pelo ângulo de disparo utilizado para chaveamento de seus tiristores. A depender deste ângulo o compensador poderá operar na região capacitiva ou na região indutiva, sendo que determinadas faixas de valores angulares representam regiões de ressonância, onde o compensador não deve operar [5].
A fim de determinar as características do compensador utilizado neste estudo de caso, foi utilizado o recurso de loop com constantes do software PS Simul. Com isso, o ângulo de disparo utilizado para chaveamento dos tiristores foi declarado como uma constante no software e realizou-se a variação desta constante de 0° à 90° com o passo de 1°. Feito isso, para cada simulação realizada, foi aferida a impedância do TCSC. As figuras 7 e 8 ilustram os valores de impedâncias aferidos em cada uma das simulações nos modos de operação indutivo e capacitivo, respectivamente. Observa-se que no modo indutivo foram obtidas impedâncias com valores de 19,8 Ω (0°) a 65 Ω (46°), enquanto que no modo capacitivo os valores na faixa de 139 Ω (69°) a 120 Ω (90°).

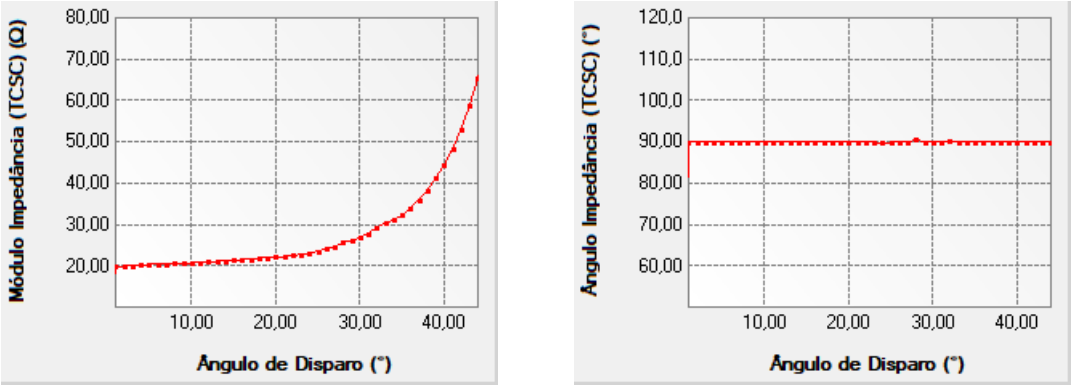

Fig. 7. Variação do módulo e ângulo da impedância do TCSC no modo de operação indutivo.

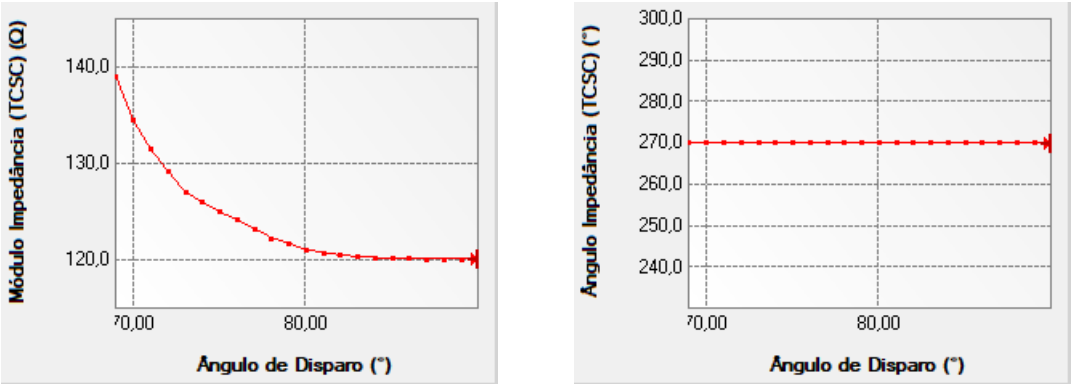

Fig. 8. Variação do módulo e ângulo da impedância do TCSC no modo de operação capacitivo.

A potência nominal transferida neste sistema (sem atuação do TCSC) é de cerca de 110MW. Baseando-se nos valores de impedâncias obtidos nas Figuras 7 e 8, além de considerar os dados de tensões e ângulos do sistema analisado, pode-se inferir a potência transmitida em cada um dos modos de operação do compensador. Com a atuação do TCSC no modo de operação indutivo a potência transferida poderá variar de aproximadamente 85 MW a 100 MW, ou seja, no modo indutivo o compensador reduz a capacidade de transferência de potência e, por isso, é raramente utilizado. Já no modo de operação capacitivo, a potência transferida poderá variar de aproximadamente 490 MW a 830 MW, sendo este o modo de operação mais utilizado devido à sua capacidade de elevar os níveis de transferência de potência do sistema.
A fim de se comprovar tais resultados teóricos, foram realizadas simulações no software PS Simul com o compensador série operando nos modos indutivo e capacitivo. O ângulo de disparo utilizado para geração dos pulsos aos tiristores do compensador foi ajustado pela atuação do controlador com base na impedância de referência determinada pelo usuário.
Foram realizadas simulações considerando a chave bypass do compensador inicialmente fechada e sendo aberta no instante t = 1 segundo. Posteriormente, variações nas impedâncias de referência aplicadas no

controlador foram feitas, de forma a verificar a resposta do mesmo diante de tais mudanças. As variações simuladas foram:

$$Modo\ Indutivo = \begin{cases} t = 1\ seg,\ Zref = 19{,}8\ \Omega \\ t = 4\ seg,\ Zref = 65{,}0\ \Omega \end{cases} \qquad Modo\ Capacitivo = \begin{cases} t = 1\ seg,\ Zref = 120{,}7\ \Omega \\ t = 4\ seg,\ Zref = 136{,}0\ \Omega \end{cases}$$

As Figuras 9 e 10 mostram as formas de onda da resposta do controlador (a) e da potência transmitida (b) para os modos de operação indutivo e capacitivo, respectivamente.

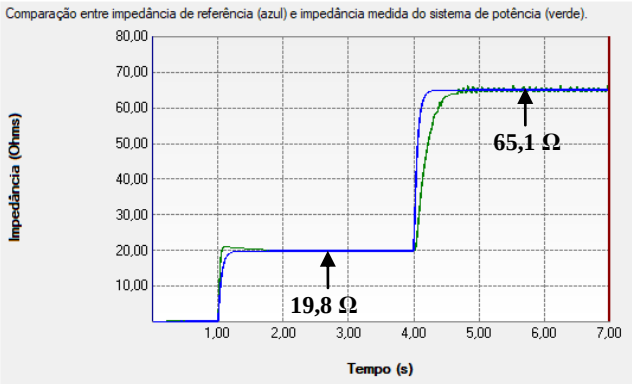

Fig. 9-(a). Resposta do Controlador.

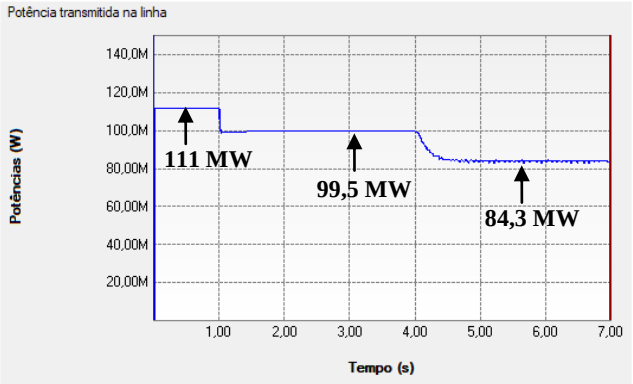

Fig. 9-(b). Potência transmitida.

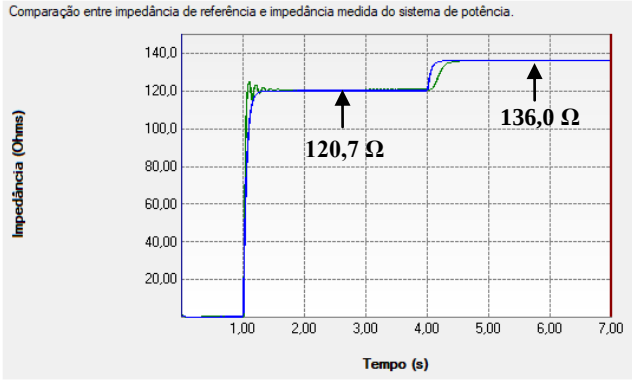

Fig. 10-(a). Resposta do Controlador.

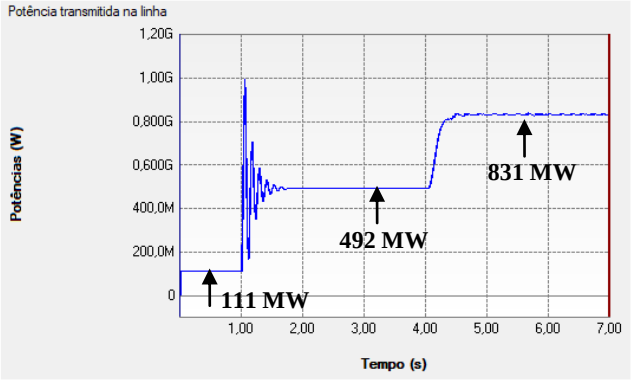

Fig. 10-(b). Potência transmitida.

Percebe-se pelas formas de onda que para todas as condições propostas neste estudo, o controlador atuou devidamente no ajuste do ângulo de disparo dos tiristores do compensador série. Dessa forma, os níveis de potência transferida pela linha de transmissão foram alterados, de acordo com a impedância imposta como referência, comprovando o funcionamento efetivo do compensador série.

Uma vez que todos os resultados foram satisfatórios, pode-se concluir que o PS Simul se mostrou uma poderosa ferramenta para análises envolvendo a compensação série de linhas de transmissão. Salienta-se ainda a grande vantagem do software, por oferecer em sua biblioteca diversos modelos de compensadores e seus respectivos controles.

3.3 Modelagem do sistema HVDC CIGRÉ Benchmark:

Este estudo visa mostrar a modelagem, no software PS Simul, de um sistema referência adaptado por um grupo de estudos do CIGRÉ que objetiva tornar possível a análise sobre aspectos de controle dos sistemas de transmissão DC. Tal modelo vem sendo utilizado por fabricantes e pesquisadores do mundo todo para testes e avaliações de desempenho de sistemas HVDC [6].

O sistema HVDC modelado, é constituído por um arranjo monopolar +/- 500 kV e 1000 MW, estações conversoras de 12 pulsos conectadas à sistemas AC relativamente frágeis, caracterizados por uma razão baixa entre a potência transmitida pelo elo e o nível de curto-circuito da rede, propriedade esta que para fins do sistema de controle, cria graus de dificuldade maiores no que diz respeito à fenômenos relacionados a

condições dinâmicas de operação. Os filtros AC também foram adicionados a fim de absorver os harmônicos gerados pelos conversores e fornecer potência reativa para os mesmos.

Neste estudo, a ponte retificadora é provida do controle de corrente e do controle de ângulo de disparo mínimo. Já a ponte inversora é provida de um controle de ângulo de extinção mínimo e de um controle de corrente. A fim de garantir uma operação satisfatória e segura dos equipamentos, são estabelecidos limites para a corrente, tais como: limite máximo, limite mínimo e limite de corrente dependente da tensão [7]. Segue representado na Figura 11 o sistema modelado no software PS Simul.

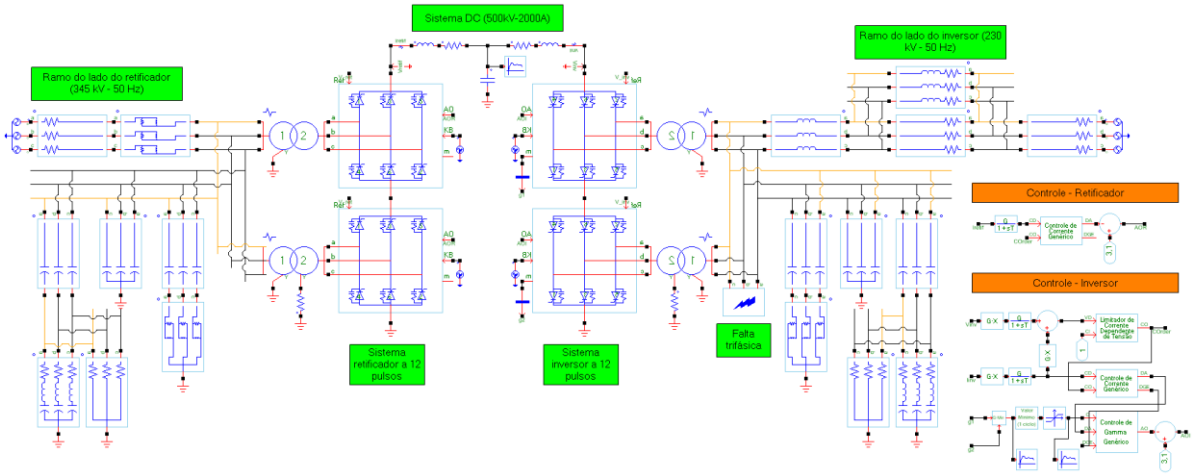

Fig. 11. Sistema modelado no programa PS Simul para análise do sistema HVDC [6].

A fim de visualizar o comportamento do sistema e seu controle frente a contingências no sistema, foi simulada, no lado AC do inversor, a ocorrência de uma falta trifásica com duração de três ciclos. As Figuras 12 e 13 mostram as formas de onda obtidas para tensões e correntes (DC e AC) no retificador e inversor.

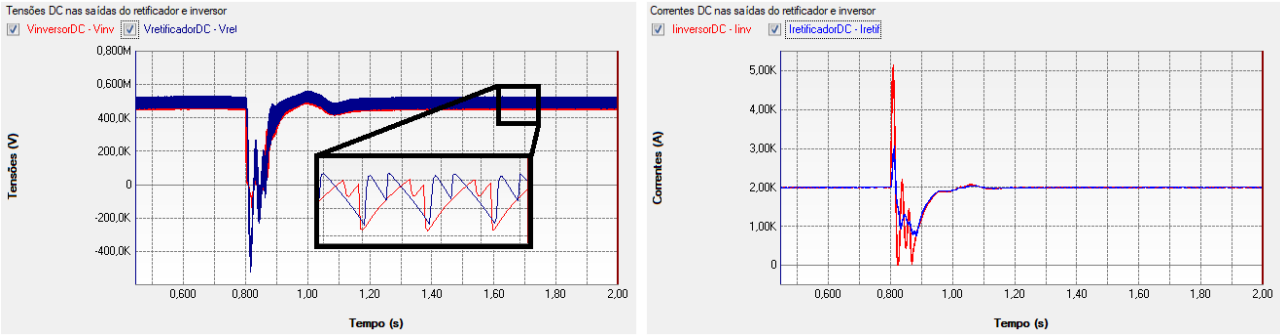

Fig. 12. Formas de onda das tensões e correntes DC nas saídas do retificador (azul) e inversor (vermelho)

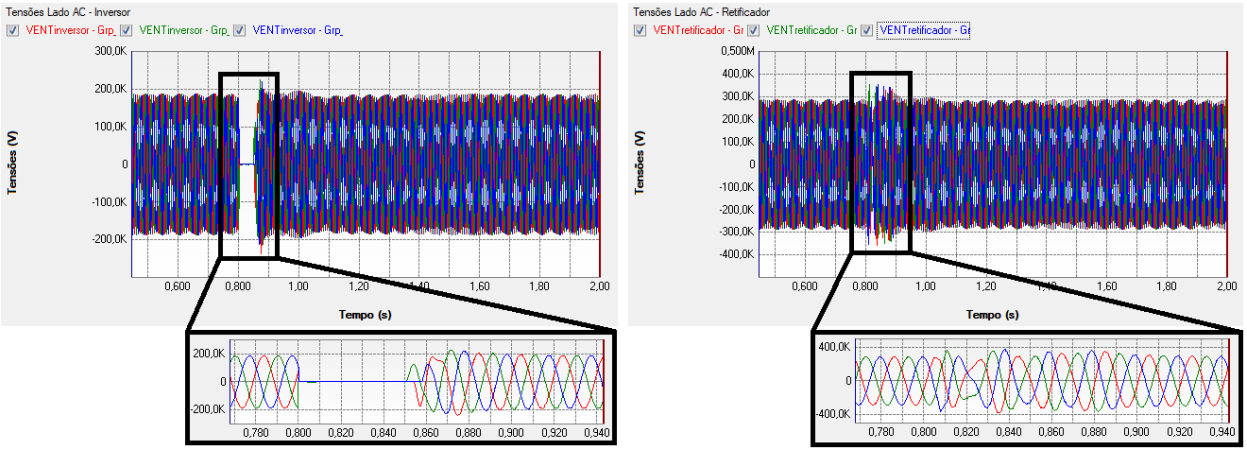

Fig. 13. Formas de onda das tensões e correntes AC nas entradas do retificador e inversor.

É possível verificar que a queda de tensão AC resultante da contingência simulada levou ao colapso de tensão DC no sistema. Verifica-se que a corrente DC medida no inversor apresentou pico de aproximadamente 2,6 pu e posteriormente atinge um limite mínimo com algumas oscilações. Já a corrente medida no retificador, apresentou pico de aproximadamente 1,6 pu e, em seguida, sofre redução devido a atuação do controlador de corrente que tende a elevar o valor do ângulo de disparo do retificador para tentar manter a corrente constante. O processo de recuperação dos níveis de tensão e corrente do sistema é iniciado imediatamente após a falta ser extinta e o sistema leva aproximadamente 300 ms para se recuperar completamente. É possível promover uma recuperação mais rápida do sistema após a falta com o aumento dos ganhos proporcional e integral dos controladores de corrente, contudo, o aumento de tais ganhos pode tornar o sistema oscilatório, comprometendo o desempenho do mesmo.

Pode-se concluir então, a partir das análises das formas de onda, que o sistema e seu controle se comportaram conforme esperado. De acordo com a literatura, o tempo médio que um sistema DC leva para se recuperar quando ocorrem faltas nos barramentos AC das pontes conversoras é de 100 à 500 ms, portanto, o tempo de recuperação obtido na simulação realizada está dentro da faixa esperada [7]. Outro aspecto importante a ser ressaltado é a versatilidade do software PS Simul para realização de tais simulações, já que todos os controladores utilizados, tanto para geração de pulsos, quanto para geração dos ângulos de disparo aos sistemas conversores (controle de corrente, ângulo de extinção e tensão) já são disponibilizados na biblioteca do software, o que facilita e agiliza o trabalho de simulação.

4 CONCLUSÕES

O trabalho apresentou uma ferramenta de origem sul-americana direcionada à simulação de transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos. Tal ferramenta foi utilizada para abordar estudos envolvendo compensadores shunt operando como reguladores de tensão da rede, compensadores série sendo efetivos no aprimoramento dos níveis de transferência de potência de um sistema de transmissão e a modelagem de sistemas HVDC (CIGRÉ Benchmark). Em todos os estudos propostos, os resultados foram satisfatórios e condizentes com o que apresenta a literatura.

Assim conclui-se, a partir dos resultados apresentados nos estudos, que o software apresentado mostrou extrema eficácia no processo de modelagem, simulação e análise de resultados para sistemas CA, CC e equipamentos FACTS. Ressalta-se ainda a versatilidade desta ferramenta, por já incluir em sua biblioteca diversos modelos prontos, permitindo enorme ganho de tempo para realização dos estudos propostos.

5 REFERÊNCIAS

[1] Conprove Engenharia, Indústria e Comércio, PS SIMUL: Software para Modelagem do Sistema de Potência e Simulação de Transitórios Eletromagnéticos. Acesso em 05 de dezembro de 2018, em: http://www.conprove.com.br/pub/i_ps_simul.html

[2] Watanabe, E. H., Barbosa, P. G., Almeida, K. C. e Taranto, G. N. (1998). “Tecnologia FACTS – tutorial”, SBA Controle & Automação vol. 9 nº 1, pp. 39-55.

[3] C. Gama, L. Amgquist, G. Ingestrom, M. Noroozian,; Comissioning and Operative Experience of TCSC for Damping Power Oscillation in the Brazilian North-South Interconnection; Proc. Of the IEEE/PES Summer Meeting, Edmonton, Canadá, Julho 1999.

[4] Martins, N., Pinto, H. J. C. P. e Paserba, J. J. (1999). TCSC Controls for Line Scheduling and System Oscillation damping – results for a small example system, Proceedings of 13th Power System Computation Conference (PSCC), Trondheim, Norway pp. 1244-1251.

[5] D.Jovcic, G.N.Pillai "Analytical Modelling of TCSC Dynamics" IEEE Transactions on Power Delivery, vol 20, Issue 2, April 2005, pp. 1097-1104.

[6] Szechtman, M., Wess, T., Thio, C. (1991). First Benchmark Model for Study of HVDC Control Studies. Electra, 54-67.

[7] Kundur, P. (1994). Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill.