



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GAT/22
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – IV

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

**AValiação de uma metodologia para a análise da interação torcional subsíncrona
com elos CCAT utilizando os programas PSCAD e ATP**

**Guilherme Sarcinelli Luz (*) Fernando Cattan Jusan
FURNAS Centrais Elétricas S.A.**

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo apresentar os resultados de uma análise comparativa entre os programas PSCAD e ATP, de modo a verificar a consistência de uma metodologia proposta para a análise da Interação Torcional Subsíncrona (SSTI – *SubSynchronous Torsional Interaction*) associada a elos CCAT. Para isso, foi utilizado um sistema apresentado na referência (1), onde tanto o sistema CCAT, utilizado nos estudos do R2 do Madeira, como os sistemas CA, que incluem máquinas síncronas no retificador e no inversor, já se encontravam validados entre os dois programas e apresentavam resultados confiáveis para viabilizar este tipo de averiguação.

Esta metodologia foi utilizada anteriormente para avaliar a existência de Interação Torcional entre a conversora Back-to-back de Melo e algumas máquinas térmicas mais próximas do lado brasileiro. Este trabalho visou verificar a consistência da metodologia ali aplicada e confirmar alguns resultados conhecidos na literatura mundial sobre este fenômeno associado às conversoras CCAT.

PALAVRAS-CHAVE

Interação Torcional Subsíncrona, Ressonância Subsíncrona, Elo CCAT, Amortecimento Elétrico, PSCAD, ATP

1.0 - INTRODUÇÃO

Com a retomada dos investimentos na geração de energia hidroelétrica no Brasil, especialmente no aproveitamento dos rios da região Norte do Brasil, novos empreendimentos de transmissão em CCAT mostraram ser a alternativa técnica e economicamente mais viável, tais como os bipolos do Madeira e de Belo Monte. Além disso, conexões elétricas com sistemas de países vizinhos, cuja frequência é diferente de 60Hz, requerem a implantação de sistemas back-to-back em CCAT, a exemplo da recente conexão, Melo, com o Uruguai.

Dentro deste cenário, surge a necessidade da avaliação da possibilidade de ocorrência do fenômeno denominado interação torcional subsíncrona (SSTI – *SubSynchronous Torsional Interaction*) entre o sistema de controle destes elos CCAT com o eixo dos geradores próximos às estações conversoras, especialmente na operação como retificador. Para isso, faz-se indispensável uma representação adequada do modelo do elo CCAT com seus controles, bem como do sistema elétrico com a representação da máquina síncrona em análise. A máquina deve incluir uma representação a parâmetros concentrados do eixo mecânico turbina-gerador, de modo a verificar se as frequências torcionais deste sistema mecânico são susceptíveis ao fenômeno de SSTI. Este fenômeno ocorre quando o amortecimento elétrico visto pela máquina é negativo e superior em módulo ao amortecimento mecânico intrínseco à turbina em uma destas frequências. Nesta situação, um controle suplementar, denominado SSDC (*SubSynchronous Damping Controller*), deve ser implementado adicionalmente às malhas de controle do elo CCAT, de modo a tornar positivo o amortecimento elétrico visto pela máquina na(s) frequência(s) de interesse.

(*) Rua Real Grandeza, n° 219 – sala 110 - Bloco E – CEP 22.281-900 Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2528-3605 – Fax: (+55 21) 2528-5528 – Email: guiluz@furnas.com.br

Para o caso de máquinas hidráulicas, onde se espera um amortecimento mecânico modal elevado, este fenômeno em geral não é relevante (2). As máquinas térmicas, porém, são mais propícias à ocorrência de interação adversa por três motivos principais: a) a viscosidade do vapor é menor do que a da água produzindo, com isso, um amortecimento mecânico menor; b) A inércia modal e o amortecimento modal não são tão elevados quanto no caso das hidráulicas; c) estas máquinas possuem, em geral, mais de uma frequência torcional, devido à existência de estágios de diferentes pressões ao longo do eixo mecânico. No Brasil, estas máquinas estão em geral próximas a conversores que operam na condição de inversor, onde a literatura não tem apontado, até o momento, problemas de SSTI. No caso, porém, de uma interligação entre dois países onde é prevista a transmissão de potência nos dois sentidos, a condição de retificador precisa ser analisada.

A implantação do back-to-back de Melo, pelas empresas brasileira e uruguaia, Eletrobrás e UTE, respectivamente, exigiu uma análise do risco de SSTI, em virtude da proximidade de máquinas térmicas do complexo de P. Médici próximas a este novo empreendimento. Uma metodologia para análise deste fenômeno havia sido apresentada há pouco tempo utilizando o programa PSCAD (2). Entretanto, o modelo do back-to-back, fornecido pela UTE, estava disponível apenas no programa ATP e não se conheciam as frequências torcionais das máquinas em análise. Deste modo, foi necessário adaptar a metodologia utilizada com o PSCAD para o programa ATP permitindo o cálculo do amortecimento elétrico em uma faixa de frequências subsíncronas (3). Uma vez adaptada a metodologia original e aplicada ao sistema em análise, foi observada a presença do fenômeno de interação torcional em uma das máquinas, mesmo com a conversora próxima operando na condição de inversor.

Assim, com o propósito de avaliar se os resultados obtidos com o programa ATP eram consistentes, decidiu-se fazer a análise comparativa com o programa PSCAD que está apresentada neste artigo.

Avaliação semelhante deverá ser realizada para o segundo bipólo do sistema de transmissão de Belo Monte, no qual o terminal na região Sudeste estará localizado próximo a usinas térmicas, como Angra, UTE Leonel Brizola e UTE Baixada.

2.0 - CÁLCULO DO AMORTECIMENTO ELÉTRICO

A avaliação da interação torcional pode ser feita através da avaliação do amortecimento elétrico visto da máquina em análise e comparando ao amortecimento mecânico esperado para cada frequência torcional associada ao seu eixo mecânico. Entretanto, caso o amortecimento elétrico seja positivo na faixa de frequência subsíncrona, é possível concluir que não haverá interação torcional adversa devido a SSTI.

2.1 Metodologias utilizadas

O amortecimento elétrico visto associado ao eixo de uma máquina pode ser calculado através de dois meios distintos, quais sejam:

1. Não sendo necessária a representação do sistema de eixo mecânico da turbina-gerador, uma variação na velocidade elétrica é imposta pelo gerador ao sistema e a variação do torque elétrico devido à ação do sistema elétrico sobre o rotor do gerador é medida. O cálculo da parte real da variação do torque elétrico em função da variação da velocidade elétrica (dT_e/dW_e) corresponde ao amortecimento que o sistema elétrico impõe ao sistema mecânico da máquina.
2. Através da representação do sistema de eixo mecânico da turbina-gerador, considerando-se amortecimento mecânico nulo, é imposta uma variação do torque mecânico na frequência do modo torcional, excitando-o e medindo a oscilação angular das massas. O amortecimento elétrico [1] é derivado a partir do decremento logarítmico da oscilação angular [2] associado ao modo em análise, através das seguintes relações:

$$D_{el} = \delta_{el} * 4 * H_m * f_m \quad [1]$$

$$\delta_{el} = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{A_o}{A_n} \right) \quad [2]$$

D_{el} – Amortecimento do sistema elétrico
 δ_{el} – Decremento logarítmico
 H_m – Inércia modal associada ao modo torcional
 f_m – Frequência do modo torcional
 A_o
 A_n – Amplitude da oscilação nos instantes t_o e t_n
 n – número de ciclos entre t_o e t_n

Ambas as metodologias foram utilizadas na referência (2) com o programa PSCAD, confirmando que elas produzem os mesmos resultados.

Para o programa ATP, contudo, a primeira metodologia não se mostrou viável e uma adaptação da segunda metodologia foi desenvolvida de modo a considerar o fato de que os dados do sistema mecânico da turbina-gerador não sejam conhecidos. Assim, a partir de um sistema mecânico que considera apenas duas massas é possível calcular o amortecimento elétrico atendendo aos seguintes princípios:

- a) a soma das inércias (H_g e H_t) deve corresponder à inércia total da máquina em análise;
 b) a constante de elasticidade (K) deve ser calculada em função da frequência torcional subsíncrona que se deseja analisar de acordo com a expressão [3] abaixo:

$$K = \frac{H_g * H_t * (2\pi * f_m)^2}{(H_g + H_t)} \quad [3]$$

- c) a ação do sistema elétrico não depende do sistema mecânico, mas seu efeito pode ser quantificado pelo expressão [1] e a inércia modal (H_m) correspondente pode ser obtida pela expressão [4] abaixo:

$$H_m = \frac{H_g * (H_g + H_t)}{H_t} \quad [4]$$

Para a condição em que o termo $(H_g + H_t)$ seja mantido, o impacto do sistema elétrico no eixo mecânico será definido pela relação $\frac{H_g}{H_t}$, como indicado na literatura, e ficará compensado pelo valor da inércia modal. O item 3.2 apresenta a comprovação deste efeito.

2.2 Implementação no programa ATP

Foi possível automatizar, no programa ATP, em uma única simulação de processamento múltiplo, descrita detalhadamente na referência (3), o cálculo de toda a faixa de frequência de interesse através dos seguintes recursos:

- a) A função \$PARAMETER, com a utilização da variável KNT, permitiu o processamento múltiplo das várias frequências viabilizando o cálculo interno da constante de elasticidade correspondente, bem como a obtenção da amplitude para o torque mecânico de modo a produzir uma oscilação angular adequada.
 b) As funções da MODELS: DEPOSIT(TMAX, TMAX2) e WRITE1(FREQ,DEPU) permitiram, respectivamente, a adaptação do tempo de simulação de cada frequência de interesse de modo a manter um número de ciclos constante (20 ciclos) para o cálculo do decremento logarítmico e registrar em um arquivo a parte os vários valores de frequência e amortecimento elétrico associados tornando mais prática a leitura dos resultados finais de uma dada condição operativa.

2.3 Compensação do amortecimento mecânico intrínseco no ATP

Como o programa PSCAD permite o cálculo do amortecimento elétrico utilizando as duas metodologias, foi possível a comparação dos resultados entre os dois programas. Entretanto, um aspecto relevante que deve ser considerado é que, enquanto o modelo de máquina síncrona no programa PSCAD requer um sinal de entrada de **torque mecânico**, no ATP a máquina síncrona é modelada internamente considerando que a entrada é um sinal de **potência mecânica** (4). Esta premissa do programa ATP resulta em um amortecimento mecânico intrínseco que pode ser demonstrado pelas expressões abaixo:

$$P = T \cdot w, \text{ logo } dP = dT \cdot w_0 + T_0 \cdot dw$$

Assumindo potencia mecânica constante, temos:

$$dT \cdot w_0 + T_0 \cdot dw = 0.0$$

$$\text{logo: } dT/dw = -T_0/w_0.$$

Considerando $w_0 = 1.0$ pu, temos uma parcela de amortecimento dT/dw inerente à condição de operação com potencia constante igual ao valor inicial do torque elétrico aplicado ao rotor, que corresponde aproximadamente à potencia ativa terminal da máquina (P_a), em pu. Para obter resposta equivalente às obtidas com o PSCAD, este amortecimento intrínseco pode ser compensado dividindo-se a potência mecânica de entrada pelo sinal de velocidade do gerador. Alguns resultados comparativos utilizando o caso de máquina conectada a uma carga comprovou esta diferença existente entre os programas, bem como a efetividade da compensação desta parcela através do torque mecânico, conforme ilustrado no item 3.1.

$H_g = \frac{H_t}{3}$ para a frequência crítica de 32.5 Hz. Observa-se que os resultados da oscilação angular, para a condição em que a frequência corresponde a maior amplitude do valor do amortecimento elétrico negativo, confirmam que, quanto maior for a relação $\frac{H_g}{H_t}$, menor será o efeito do sistema elétrico sobre o sistema mecânico.

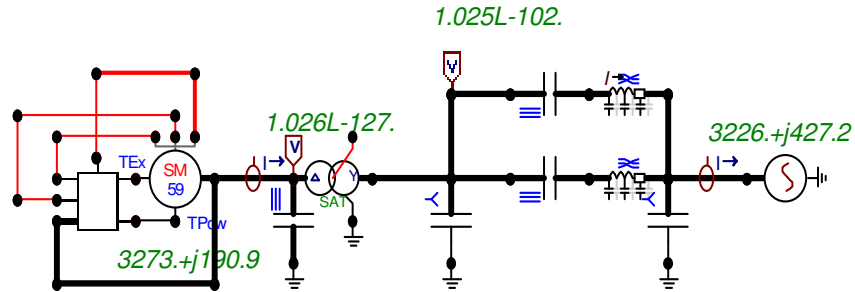


Figura 4 – Máquina e linha com compensação série

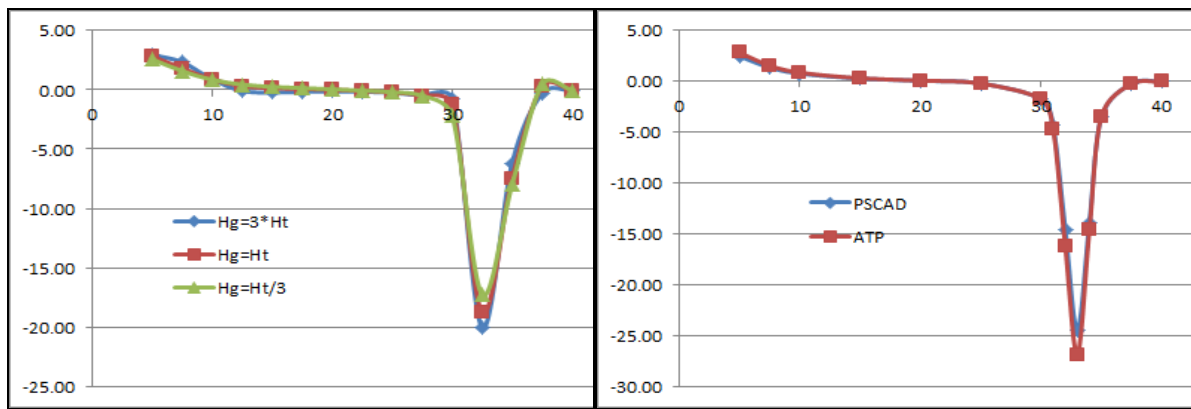
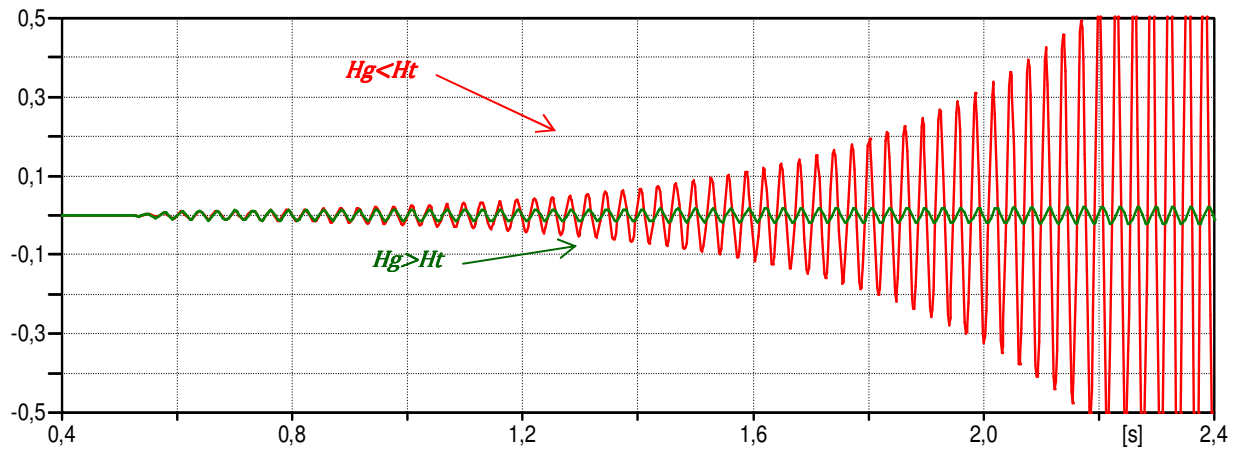


Figura 5 – Del x frequência (Hz) – Relações entre Hg e Ht

Figura 6 – Del x frequência (Hz) – ATP x PSCAD



de_maqxbinf_cs_hgmeht_32.5hz.pl4: m:ANG
de_maqxbinf_cs_hgmaht_32.5hz.pl4: m:ANG

Figura 7 – Oscilação angular entre as massas ($H_g < H_t$ e $H_g > H_t$)

3.3 Máquina conectada a um conversor CCAT operando como retificador

Os estudos do R2 do sistema Madeira foram realizados utilizando-se de um sistema CCAT desenvolvido no programa PSCAD que foi, posteriormente, representado e validado no programa ATP. A referência (1) faz uma comparação dos resultados entre os dois programas representando este sistema CCAT e considerando duas e tres máquinas, respectivamente, no retificador e inversor. A máquina que está sendo analisada neste artigo foi conectada isoladamente no retificador deste sistema CCAT, como mostrado na Figura 8. O amortecimento elétrico visto desta máquina foi avaliado para as seguintes condições do controle do retificador:

- a) Mantido os valores originais para os ganhos
- b) Alterados os ganhos proporcionais do PLL e do CCA no retificador
- c) Alterados os taps do retificador e inversor para que o retificador opere em alfa mínimo.

3.3.1 Controle com ganho originais – $K_{P_{CCA}}=90$. e $K_{P_{PLL}}=200$.

A Tabela 1 e a Figura 9 mostram os resultados do amortecimento elétrico obtido nos dois programas. Como pode ser visto os resultados são bastante semelhantes.

Freq (Hz)	ATP-PLLorig	PSCAD-PLLorig
5	-0.79	-0.84
7.5	-0.74	-0.77
10	-0.66	-0.67
12.5	-0.58	-0.59
15	-0.53	-0.53
17.5	-0.48	-0.48
20	-0.43	-0.44
25	-0.36	-0.36
30	-0.28	-0.26
35	-0.18	-0.16
40	-0.05	-0.01

Tabela 1 – Amortecimento Elétrico (Del) em pu

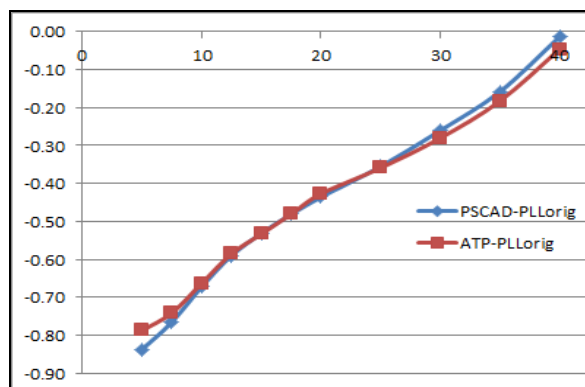


Figura 9 – Del x frequência (Hz) – ATP x PSCAD

3.3.2 Controle com ganhos alterados – $K_{P_{CCA}}=15$. e $K_{P_{PLL}}=50$.

A Tabela 2 mostra os resultados do amortecimento elétrico obtido nos dois programas para os valores do ganho do PLL e do CCA do retificador alterados de modo a intensificar a interação do controle com o eixo da máquina. Este fato indica que a malha de controle do retificador pode apresentar uma interação maior ou menor dependendo de seus parâmetros. A Figura 10 apresenta os resultados comparados com os valores de ganho originais onde poder ser visto que os resultados para as duas condições são bastante semelhantes entre os dois programas.

Freq(Hz)	ATP-PLLmod	PSCAD-PLLmod
5	-2.04	-1.98
7.5	-3.00	-2.90
10	-3.20	-3.03
12.5	-2.58	-2.41
15	-1.73	-1.61
17.5	-1.02	-0.97
20	-0.64	-0.55
25	0.13	0.19
30	0.78	0.82
35	1.59	1.54
40	2.46	2.29

Tabela 2 – Amortecimento Elétrico (Del) em pu

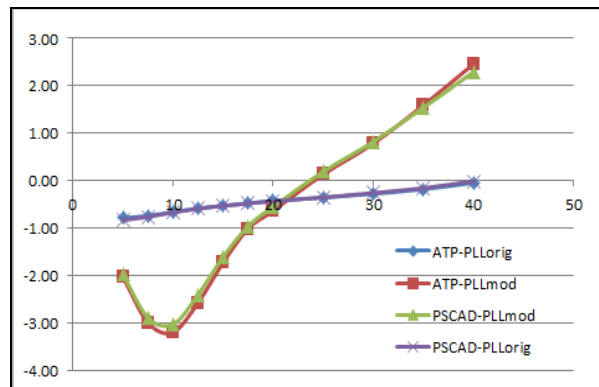


Figura 10 – Del x frequência (Hz) – ATP x PSCAD

3.3.3 Controle em alfa mínimo

A Tabela 3 mostra os resultados do amortecimento elétrico obtido nos dois programas para a condição de ganhos modificados, porém considerando os taps dos transformadores conversores alterados no retificador e inversor de modo que o retificador opere em alfa mínimo. Este fato indica que a interação entre o retificador e o sistema de eixo da máquina fica restringida pela inibição da ação de controle de corrente do retificador. A Figura 11 apresenta os resultados comparados para as duas condições onde poder ser visto que os resultados são bastante semelhantes entre os dois programas.

Freq(Hz)	ATP	PSCAD
5	-0.28	-0.44
7.5	0.00	-0.10
10	0.28	0.23
12.5	0.51	0.49
15	0.70	0.70
20	0.96	1.02
25	1.05	1.14
30	1.09	1.15
35	1.19	1.27
40	1.38	1.49

Tabela 3 – Amortecimento Elétrico (Del) em pu

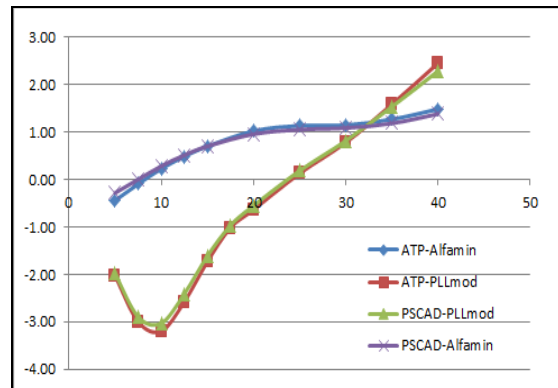


Figura 11 – Del x frequência (Hz) – ATP x PSCAD

3.3 Máquina conectada a um conversor CCAT operando como inversor

Em seguida esta mesma máquina foi conectada ao inversor do sistema Benchmark CCAT, porém com uma potência nominal reduzida para 360 MVA de modo a aumentar o fator de interação UIF (Unit Interaction Factor) cujo valor é inversamente proporcional ao MVA da máquina em análise. A Figura 12 mostra o sistema representado tendo em destaque a máquina em análise.

A Tabela 4 mostra os resultados do amortecimento elétrico obtido nos dois programas para esta condição de operação conectada ao inversor, onde os resultados confirmam o que se lê na literatura em geral sobre o fato do amortecimento ser positivo em toda a faixa subsíncrona. A Figura 13 apresenta a comparação dos resultados entre os dois programas que se mostraram, mais uma vez, bastante semelhantes.

Freq(Hz)	PSCAD	ATP
5	6.55	6.86
7.5	4.8	4.53
10	3.4	3.24
12.5	2.2	2.41
15	1.47	1.51
20	0.8	0.96
25	0.67	0.67
30	0.69	0.51
35	0.55	0.46
40	0.38	0.37

Tabela 4 – Amortecimento Elétrico (De) em pu

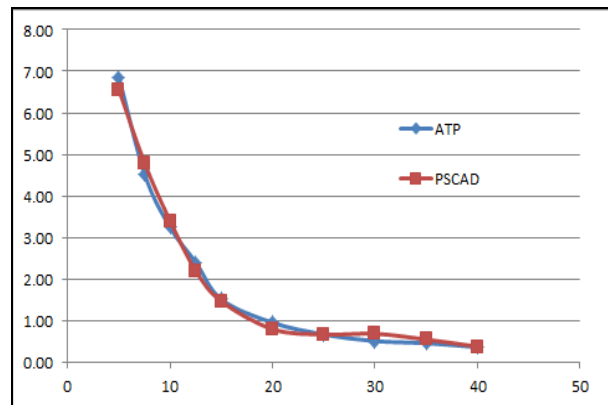


Figura 13 – Del x frequência (Hz) – ATP x PSCAD

4.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou que os programas ATP e PSCAD produzem resultados semelhantes na análise do fenômeno da Interação Torcional Subsíncrona entre o sistema de eixo mecânico de uma máquina síncrona e o controle de um elo CCAT, desde que os dados sejam fornecidos de forma consistente, mesmo envolvendo a representação de um sistema bastante complexo.

A metodologia adaptada para o programa ATP para a análise deste fenômeno é consistente e permite uma avaliação da interação torcional mesmo não dispondo dos dados do sistema mecânico associado à máquina em análise.

Os resultados obtidos em (5) para a análise deste fenômeno utilizando o modelo em ATP do Back-to-back de Melo podem ser considerados consistentes, apesar de ter sido observada a presença do fenômeno de interação torcional em uma das máquinas com a conversora próxima operando na condição de inversor. Uma avaliação mais detalhada pode ser realizada para se evidenciar em que condições de operação do inversor esta interação pode acontecer. Esta situação é muito relevante, uma vez que novas interligações estão sendo instaladas no Brasil.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) L.P. de Almeida et al., “Sistema Benchmark no PSCAD e ATP contendo Elo de Corrente Contínua e Máquinas”, XIII SEPOPE – XIII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Foz do Iguaçu/PA, 2014.
- (2) F. C. Jusan, “Interação Torcional Subsíncrona Envolvendo Conversores CCAT e Hidrogeradores: Análise Teórica e Simulações com o PSCAD”, XXII SNPTEE – XXII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília/DF, 2013.
- (3) G. S. Luz et al., “Uma Metodologia para o Estudo da Interação Torcional Subsíncrona no Programa ATP”, XVI ERIAC - XVI Encontro Regional Iberoamericano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu/PA, 2015
- (4) Electro-Magnetic Transient Program - Theory Book – Cap. 8 - top. 8.3 – pag. 8-17
- (5) O. J. Rothstein et al., “Interconexão Brasil x Uruguai – Estudo Interação Torcional Subsíncrona”, XVI ERIAC - XVI Encontro Regional Iberoamericano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu/PA, 2015

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



GUILHERME SARCINELLI LUZ, brasileiro, nascido no RJ em 1957, engenheiro eletricitista pela UFRJ (1981) - Engenheiro de FURNAS C.Elétricas S.A., lotado na Diretoria de Operação.

Áreas de atuação: Simulação de Transitórios Eletromagnéticos e Sistemas de Corrente Contínua utilizando os programas ATP e PSCAD. Trabalha em FURNAS desde 1996, após trabalhar 11 anos na área de Consultoria na PROMON, THEMAG e Eletroconsult de Paraguay.



Fernando Cattán Jusan graduou-se em engenharia elétrica em 2003 pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro (CFET-RJ). Obteve o grau de Mestre em Engenharia Elétrica na COPPE/UFRJ em 2007 na área de oscilações subsíncronas e interação torcional com sistemas de controle de turbogeradores, FACTS e HVDC. Ingressou em FURNAS em 2004, onde trabalha na Gerência de Estudos Eletroenergéticos e Planejamento Elétrico da Operação. Desde 2008 vem trabalhando no acompanhamento do projeto, testes e comissionamento das estações conversoras do Bipólo 2 do Sistema de Transmissão HVDC do Madeira, atuando principalmente no

projeto e verificação de desempenho de filtros CA e CC, especificação dos sistemas de controle e proteção DC, avaliação do desempenho dinâmico com os programas ANATEM e PSCAD, interação com o sistema CA e especificação do circuito principal.

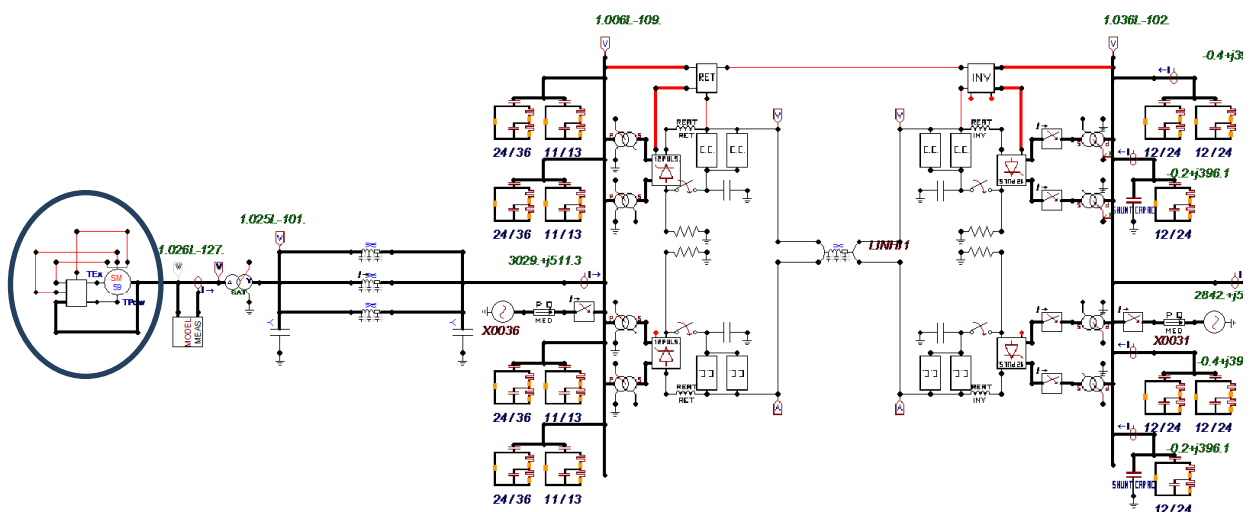


Figura 8 – Máquina conectada no retificador

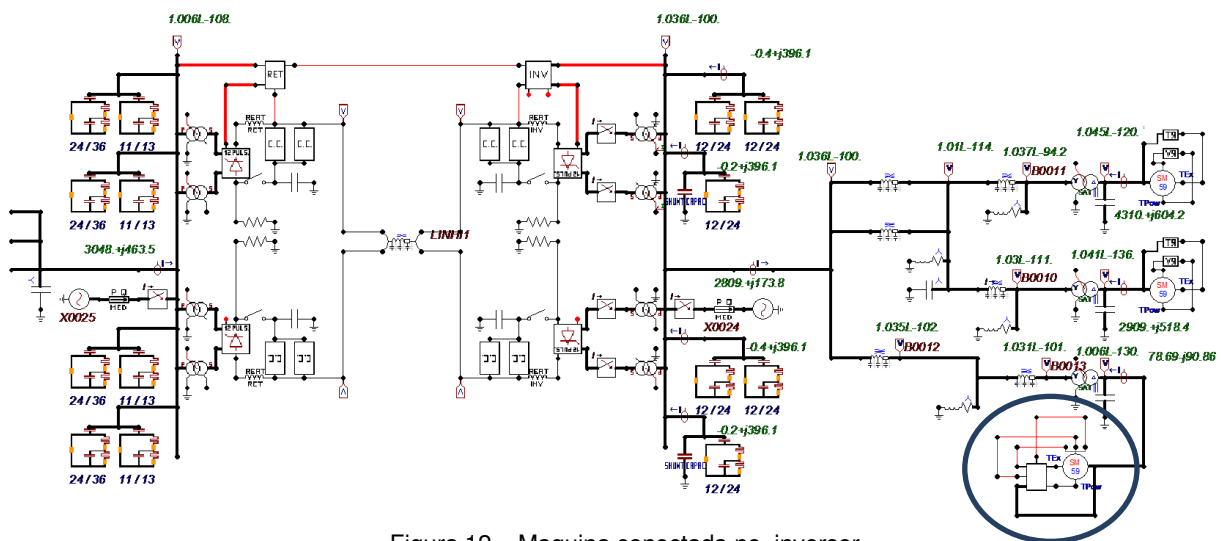


Figura 12 – Máquina conectada no inversor